

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

**Vlastnosti svarových spojů svařených metodou 43
(FSW)**

**Properties of the Welded Joint Carried out by 43
(FSW) Welding Method**

Student:

Bc. Pavel Doležel

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2013



VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Doležel**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Vlastnosti svarových spojů svařených metodou 43 (FSW)**
Properties of the Welded Joint Carried out by 43 (FSW) Welding Method

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor metody svařování 43 (FSW)
2. Navrhněte svarové spoje ocelí pro metodu svařování 43 (FSW)
3. Ověřte vlastnosti navržených svarových spojů

Seznam doporučené odborné literatury:

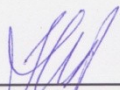
KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
Welding Handbook, Part 2. American Welding Society, 2007. 669 s. ISBN: 978-0-87171-053-6

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013


prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Litovli 10.5.2013

podpis studenta



Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Litovli

10.5.2013

Bc. Pavel Doležel

Adresa trvalého pobytu diplomanta: **Vítězná 586 784 01 Litovel**



ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Doležel P. Vlastnosti svarových spojů svařených metodou 43 (FSW):
Katedra mechanické technologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava,
2013, Diplomová práce, vedoucí Sondel Martin.

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi svarových spojů vytvořených svařovací metodou 43 (FSW). V první části popisují metodu svařování 43 a vlastnosti spojů při svařování různých kovů a slitin. Druhá experimentální část se zabývá zadáním a vyhodnocením svařených vzorků, v níž hodnotím výhody FSW svařování s běžnými svařovacími metodami.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

Doležel P. Properties of welded joints welded using method 43 (FSW):
Department of Mechanical Technology, Faculty of Mechanical Engineering VSB -
Technical University of Ostrava, 2013, Thesis, leading Sondel Martin.

This thesis deals with the properties of welded joints produced by welding method 43 (FSW). The first part describes the welding method 43 and properties of joints while welding different metals and alloys. The second experimental part deals with assignment and evaluation of welded samples and the benefits of FSW welding are compared to the conventional welding methods.



Obsah

	strana
Seznam použitého značení a zkratk.....	7
Úvod.....	8
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY A CÍLE PRÁCE.....	8
2. STUDIE METODY SVAŘOVÁNÍ 43.....	9
2.1. Metoda třecího svařování s promíšením.....	9
2.2. Nevýhody a výhody.....	12
2.3. Vybavení a ovládací prvky	13
2.4. Konstrukce nástrojů (trnů, sond).....	17
2.4.1 Upínání	19
2.5. Svařovací parametry.....	20
2.6. Oblasti třecího svařování.....	22
3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SVAŘITELNOST	24
3.1. Materiály a jejich slitiny svařované metodou FSW	25
3.2. Přenos tepla třením	33
3.3. Měření teploty.....	34
4. VLASTNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ - VZORKŮ.....	36
4.1. Volba materiálu vzorků	37
4.2. Základní zadání a vyhodnocení svarů	39
4.3. Provedené zkoušky svarů.....	42
5. ZÁVĚR.....	54
6. SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ.....	55
7. SEZNAM PŘÍLOH	57



Seznam použitých zkratek

AISI	- americké značení korozivzdorných ocelí.....	[-]
Al	- hliník.....	[-]
CP	- druh titanu (komerčně čistý).....	[-]
Cr	- chrom.....	[-]
Cu	- měď.....	[-]
ČSN	- české státní normy.....	[-]
ČSN EN	- česká verze evropské normy.....	[-]
DIN	- německá národní norma.....	[-]
F	- stupňů Fahrenheita	[-]
FSW	- Friction stir welding (třecí svařování s promíšením)	[-]
ft	- stopa (jednotka délky).....	[-]
HB	- tvrdost podle Brinella.....	[-]
hcp	- šestiúhelníková struktura mřížky	[-]
HDAZ	- tepelně a deformačně ovlivněná zóna	[-]
HfC	- hafnium karbid.....	[-]
HV	- tvrdost podle Vickerse	[-]
in	- zkratka délkové jednotky inch (anglický palec).....	[-]
lbf	- libra –síla $1 \text{ lbf} = 0,45359237 \text{ kg} \times 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ $= 4,4482216152605 \text{ N}$	[-]
Mo	- molybden.....	[-]
N	- newton	[-]
Ni	- nikl.....	[-]
PA	- označení polohy vodorovné shora	[-]
PCBM	- polykrystalický nitrid bóru	[-]
PS	- postupová strana.....	[-]
TEM	- transmisní elektronová mikroskopie	[-]
TMAZ	- termomechanicky ovlivněná zóna.....	[-]
TOO	- tepelně ovlivněná oblast	[-]
TZM	- slitiny molybdenu.....	[-]
q	- měrný tepelný příkon svařování	[J.mm ⁻¹]
ÚS	- ústupová strana	[-]
W-Re	- wolfram rhenium.....	[-]



ZM	- základní materiál	[-]
Zv	- zvětšeno	[-]

Úvod

Již několik roků trvá trend mnoha průmyslových odvětví (letectví, lodní průmysl, automobilový průmysl, kosmonautika atd.), uplatňovat stále více lehké kovy, jako jsou hliník, hořčík, měď a další jejich slitiny. Hlavním důvodem jejich obliby je kombinace nízké váhy a vysoké pevnosti. Proto je pro spojování těchto materiálů nutné hledat ty nejvhodnější způsoby s ohledem na jejich teplotu tání, chemické složení a výslednou pevnost spoje. Svařování je proces, kdy dochází ke vzniku spoje vlivem dodání tepelné energie do svaru (tavné svařování) nebo vlivem mechanické energie (tlakové svařování). Pro svařování je důležité, aby se výsledné mechanické vlastnosti spoje, co nejvíce blížily vlastnostem základnímu materiálu.

Nejvhodnější technologií pro spojování lehkých kovů je technologie FSW (Friction stir welding). Je to technologie třecího svařování, u které se využívá přeměny mechanické energie na tepelnou, avšak nedochází u ní k natavení materiálu. Spoj vzniká velkou deformací materiálu v krátkém časovém úseku.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A CÍLE PRÁCE

Tato práce si klade za cíl čitateli přiblížit metodu svařování FSW. Popisuje druhy svarových spojů, možné slitiny, které lze svařovat touto metodou a vlastnosti jejich spojů. Pro podrobný rozbor byl vybrán materiál AlMg4,5Mn0,7 svařeno 14 vzorků stoho dva s konstrukční oceli. Každý spoj zhotoven za odlišných podmínek. Tyto vzorky svarů byly vyhodnoceny jak makroskopicky tak mikroskopicky. Ve vyhodnocení stanovujeme optimální podmínky pro tvorbu bezvadného svarového spoje.



2 STUDIE METODY SVAŘOVÁNÍ 43

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 4063 rozděluje metody svařování. Jednou z těchto metod je metoda - Třecí svařování promíšením (Friction stir welding – FSW). [11]

Technologie třecího svařování

Třecí svařování je varianta svařování třením, které zhotovuje svar mezi dvěma (nebo více) obrobky zahřátím a plastickým tokem materiálu, který způsobuje rychle rotující nástroj, jenž prochází svarovým spojem. Zahřívání je způsobeno třením mezi nástrojem a obrobkem a visko-plastickou deformací materiálu při vysokých rychlostech. Obě třecí svařování pracují na principu vytvoření objemu horkého kovu podél spoje. Svařování třením se liší od třecího svařování v jednom důležitém aspektu: v třecím svařování musí probíhat relativní pohyb mezi obrobky, který se koná v kompresi, zatímco relativní pohyb v FSW je mezi obrobky a rotujícím nástrojem.

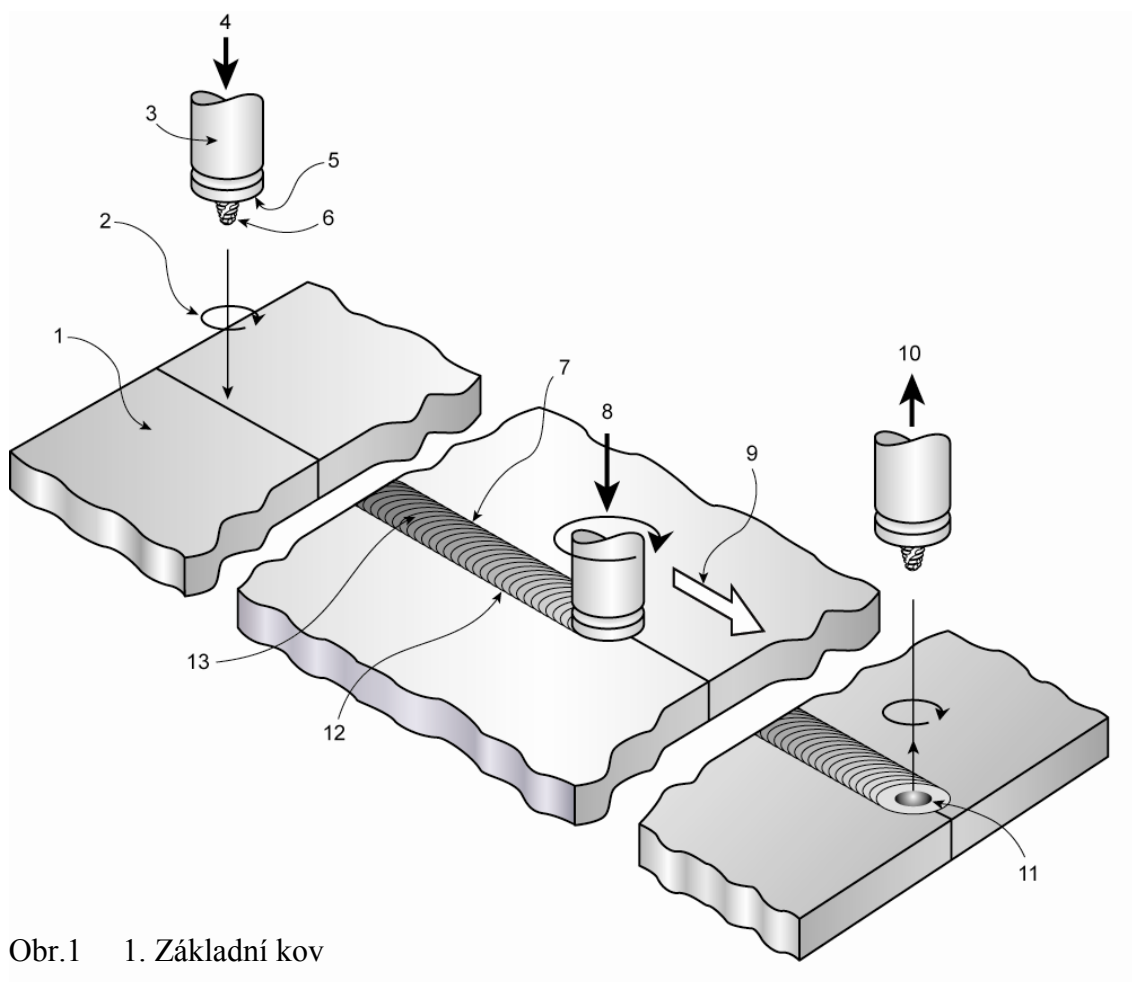
Frikční svařování je známé již od roku 1990, v roce 1991 si ho nechal patentovat institut TWI v Cambridge. Původně bylo vyvinuto hlavně pro svařování hliníkových slitin. Významný přínos tohoto procesu byl rychle velmi doceněn. A začal značně motivovat výzkum a vývoj v příštím desetiletí, který rozšířil technologii svařování s jinými materiály. [13,4]

2.1 Metoda třecího svařování s promíšením

Charakteristika

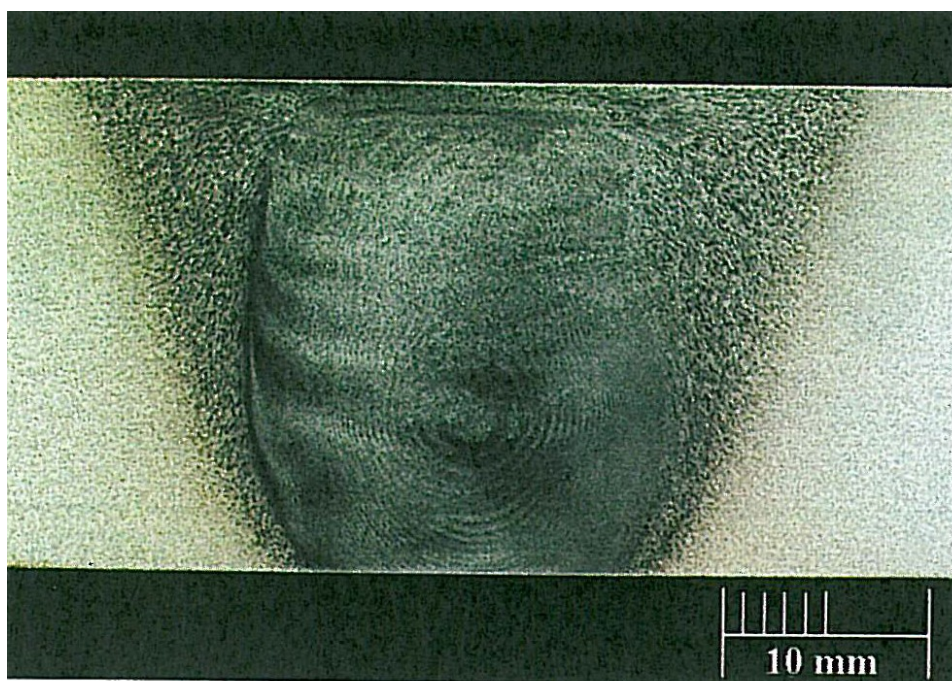
Třecí svařování s promíšením používá rotující svařovací nástroj, který vytváří teplo v určitém místě. Rotující nástroje tepelně zpracuje materiál ve svaru a kolem jeho rozhraní. Vytváří tak kontinuální pevný svar. Nástroj má tvar tyče s konkávní plochou a čepem (nebo-li sondou), která je souosá s osou otáčení. Obrobky musí být pevně přichyceny a podepírány podkladovou deskou nebo tzv. kovadlinou, která nese zátěž z

nástroje a omezuje deformace materiálu na zadní straně spoje. Ve většině případů je nástroj (kolík) navržen tak, aby byl o něco kratší než tloušťka společného svaru, aby se zabránilo kontaktu s podložkou a podpořilo kompletní pronikání bez vad. Tento proces je znázorněn na obrázku.1. [4]

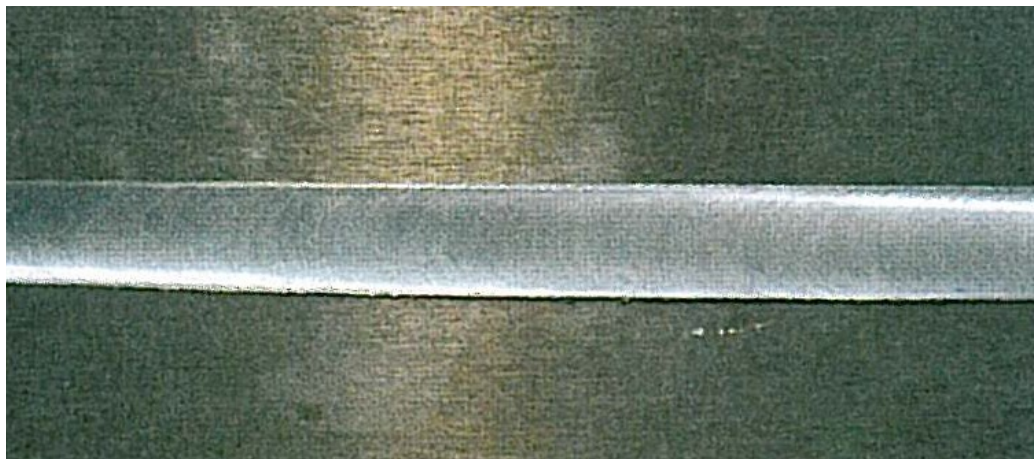


Obr.1 1. Základní kov
2. Smysl otáčení nástroje
3. Svařovací nástroj
4. Směr tlaku na nástroj
5. Rameno nástroje
6. Sonda
7. Postupující strana svaru
8. Axiální síla
9. Směr svařování
10. Pohyb nástroje nahoru
11. Koncový otvor
12. Odstupující strana svaru
13. Vzhled horní plochy svaru [1]

Aby mohl vzniknout lineární tupý svarový spoj jsou dílce umístěny na podkladové desce s hranami těsně u sebe. Chcete-li zahájit proces třecího svařování musí být rotační nástroj ponořen do svarového spoje až po rameno nástroje, které je v kontaktu s povrchy dílců. Frikční tření a visko-elastické ztráty způsobují zahřívání materiálu ke vzniku plastického toku. Pohyb nástroje napomáhá výtlaku změkčeného materiálu k vytvoření svaru. Horký, zpracovaný materiál se pohybuje kolem rotujícího nástroje, aby znovu splynul za nástrojem. Rameno nástroje slouží jako překážka proti úniku tepla svařovaného materiálu působící silou na horní plochu svaru. Byla přijata zvláštní specifikace k vyrovnání asymetrie procesu FSW vzhledem k ose svaru. Jak je uvedeno na obrázku 1 je strana svaru, kde je vektor pojezdu nástroje rovnoběžný s vektorem otáčení nástroje nazýván postupující stranou. Na opačné straně svaru, kde posouvací vektor nástroje a vektor pozice nástroje jsou antiparalelní, se označuje jako ustupující strana. Nástroj se nadále otáčí současně s posuvem podél spoje a zároveň dokončuje svar. Po dosažení požadované délky je nástroj vyjmut. Makroskopický snímek příčného řezu svaru vysoké integrity v konfiguraci tupého spojení je znázorněn na obrázku 2. Pravidelnost řádkování podél koruny třecího svaru je znázorněna na obrázku 3. [4]



Obr. 2 Makroskopický snímek příčného řezu svaru. [2]



Obr. 3 Pravidelnost řádkování podél koruny třecího svaru. [3]

Do svařování třením řadíme i tzv. svařování bodovým třením (FSSW) které je variací svařování třením, běžně se používá ke spojení plechu anebo jiných tenkých materiálů. Upravený nástroj třecího svařování se používá k proniknutí do nastavené hloubky vrchní části spoje. Bodové svařování třením se obvykle používá při překrývání spojů, takže nástroj většinou proniká pouze do malé hloubky spodního obrobku. Nástroj je zasunut zpátky, jakmile dosáhne konečné polohy.[4]

2.2 Nevýhody a výhody

Vzhledem k tomu, že třecí svařování je v podstatě proces kovářského svařování, tak také sdílí mnoho hlavních výhod a nevýhod dalších pevných procesů svařování, zejména s kovářskými svařovacími procesy. Třecí svařování se obvykle provádí v jediném průchodu s plnou penetrací a s malou nebo žádnou přípravou svarových ploch. V závislosti na materiálu svařovaného dílce a jeho tloušťce, dochází při svařování k minimálnímu zkreslení, za předpokladu, že je použito správné upnutí. Svary obvykle vykazují lepší svarové mechanické vlastnosti, jenž jsou nadřazené vlastnostem řádkových svarů. S výjimkou materiálů se vznikem velkých napětí při vysokých-provozním teplotám, jako jsou ocelové a titanové slitiny, lze třecí svařování provádět i při relativně vysokých rychlostech zpracování. Třecím svařováním může být dosaženo vyšší svařovací rychlosti než s obloukovým svařováním, ale i tak svařovací rychlost FSW nemůže být konkurenceschopná svařování laserovým paprskem. Třecí



svařování je strojní, nástrojový proces a toto hledisko neumožňuje opakovatelné svary ve výrobních aplikacích s malým zásahem obsluhy. [13]

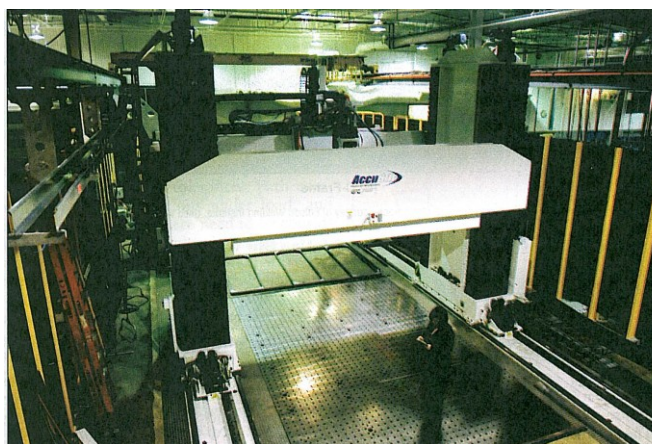
Oproti tomu nabízí FSW proces několik dalších výhod, včetně schopnosti produkovat pevné svary s malým nebo žádným zkroucením obrobku, bez kouře a roztříku, dále odstranění vad související s tuhnutím, jako jsou praskliny a pórovitost. Kromě toho, je tento proces ekologicky čistý. Při většině běžných aplikací, je dosaženo vysoce kvalitní svarů při relativně nízkých nákladech pomocí jednoduchého, energeticky efektivního mechanického zařízení. Frikční svařování lze použít ke spojení různých kovů a slitin, včetně slitin hliníku (Al), titanu, mědi, hořčíku, oceli, nerezové oceli a niklu. Lze použít řadu společných konfigurací, včetně tupých, bodových, rohových a T-spojů. Jedním z hlavních omezení FSW je, že spoj není samonosný a musí být řádně upevněn. Pokud je obrobek navržen způsobem, který vyžaduje podporu spoje, mohou být náklady na nástrojové vybavení vysoké. Nicméně náklady na svařecí stroj třecího svařování a související nástroje jsou téměř stejné jako na zařízení pro další procesy kovářského svařování. Počáteční vysoké náklady na zařízení mají obvykle rychlou návratnost investice díky vysoké kapacitě svařovacího procesu. [14]

2.3 Vybavení a ovládací prvky

Zařízení používané ke třecímu svařování zahrnuje svařovací stroj, nástroj pro svařování třením, a svařovací přípravky pro držení komponentů svařence ve správné orientaci v průběhu svařování. Tato témata a metody pro řízení procesu jsou popsány v následující kapitole.

Vybavení

Návrhy zařízení k třecímu svařování jsou obvykle konstruovány na základě některých z volných strojních platforem: C-rámy, mostové jeřáby, nebo vertikální struktury podobné těm, které používají vyvrtávačky. Dva z různých stylů zařízení jsou znázorněny na obrázku 4 (A) a (B).



Obr. 4(A) Svařovací zařízení [2]



Obr. 4(B) Svařovací zařízení [13]

Každý druh zařízení má obvykle k X, Y a Z osy s jedním motorem vřetena. Nástroj třecího svařování může být nakloněn buď s ruční nebo motorovou změnou osy. Složitější zařízení umožňují gimbaling a naklápění vřetena přidáním osy A a B. Tyto osy poskytují možnost ke svařování koutových a rovinných spojů. Dvoudílné nástroje a spodní nástroje vyžadují další koaxiální pohyb osy s vřetenem a to posun sondy ve vztahu k rameni. Některé zařízení obsahují samostatná vřetena pro sondu, které umožňují točit rameno a čep různými otáčkami, což umožňuje částečně zvýšit teplo vygenerované sondou. Každý osový pohyb je obvykle poháněn elektromotorem a převodovkou, aby byl poskytnut odpovídající točivý moment, přestože některé stroje jsou poháněny hydraulicky. Přístroje pro měření síly jsou obvykle k dispozici na každé ose pro dokumentaci řízení a výkonnosti procesů. Velikost sil v osách X a Y se pohybuje až do 22 000 N (5000lbf) pro tenké materiály a až 44 500 N (10 000lbf) pro silnější materiály. Osa Z používá jednodílného nebo dvoudílného nástroje, obvykle používá síly v rozmezí od 44 500 N (10 000 lbf) pro tenké materiály a od 156 000 N (35 000 lbf) do 222 000N (50 000 lbf) pro silnější materiály. [4]

Třecí svařování se obvykle provádí na nástrojových strojích. Svařování tenkých úseků s požitím umírněné síly se často provádí na obráběcích strojích. Silnější materiály vyžadující použití větší síly a tím vznikající tepelné jevy v procesu svařování obvykle



vyžadují zařízení speciálně určené pro proces FSW. Třecí svařovací stroje obvykle musí zachovat přesnost polohování při provozu za vysokých provozních zatížení. Přesnosti polohování je dosaženo buď kontrolou a kompenzací průhybu s vnitřními algoritmy deformace nebo kompenzací měřené polohy, které je ovlivněno zatížením, jako například od hlavy k obrobku. Alternativně může být stroj navržen tak, aby procesní síly byly rozloženy do jiných částí přístroje způsobem, který zabrání deformaci souřadného systému stroje procesním zatížením.

Třecí svařovací stroje jsou vybaveny systémy vřetenových ložisek určených k dosažení maximální funkčnosti konstrukce v požadované procesní zátěži. Další funkce vřetena mohou být navrženy pro přístroje s použitím nástrojů s nastavitelnou délkou sondy a dvoudílných nástrojů. Vřeteno může být duté, aby mohlo druhé koaxiální vřeteno pracovat uvnitř ramene vřetena. Čidla pro snímání síly jsou obvykle integrovány do strukturálního zatížení pohybu stroje sledující ponoření a odpor zatížení. To vše pro řízení a monitorování procesů, jenž má za úkol zajištění maximální kvality svařování.

Zařízení třecího svařování často zahrnuje funkce pro chlazení podkladní desky anebo nástroje FSW. Chladicí systém vřetene může být použit pro ochranu ložiska vřetene vůči teplu. Musíme podotknout, že na tvorbu procesního tepla má významný vliv délka a rozměry nástroje. Opěrná deska a upínací systém může být v případě potřeby chlazen při zachování teplotních okrajových podmínek a udržení procesu v ustáleném stavu. Zařízení pro třecí svařování, stejně jako všechny ostatní průmyslová zařízení, jsou k dispozici s řadou kinematických funkcí. Možné návrhy zařízení sahají od jednoduchého nastavení přímkového svařování jednoho svaru, s ručním nastavením úhlů sklonu na strojích s 5 nebo více stupni volnosti pro svařování komplexního svaru. Zařízení schopné kopírovat složitou dráhu svaru je obvykle vybaveno trojrozměrnou fixací, aby obrobky správně vymezovaly. Složitost tohoto obrobku se projevuje v nástroji. Pokud je ve vřetenu upnutý nástroj a používá se, je třeba aby pod svařovaným spojem nebyla v dosahu sondy podkladní deska. Metody zpětné kontroly sil jsou používány jako způsob, zajištění polohy nástroje FSW v opracovávaném materiálu anebo řízení rychlosti jeho pohybu. Při dohledu nad silou, nebo přetížením při chybě zabliká výstražná kontrolka což je nezbytné, neboť FSW stroje mají omezenou odolnost a obrobky nemají vždy stejnou tloušťku a pevnost. Vzhledem k rozdílnosti vstupního



materiálu a omezeným možností v konstrukci stroje, je kontrola síly vhodná pro minimalizaci problémů spojených s vyrovnáváním mezních tepelných stavů. Příkladem jsou termální okrajové podmínky na začátku a na konci svařované desky. Pokud se stroj odklání od pevného postavení nástroje FSW v materiálu, potom se řídící síly snaží přesunout nástroj k ose svaru, aby se obnovil tlak, tvárnost stroje nebo kontrolní systém, který kompenzuje vychýlení stroje.[4]

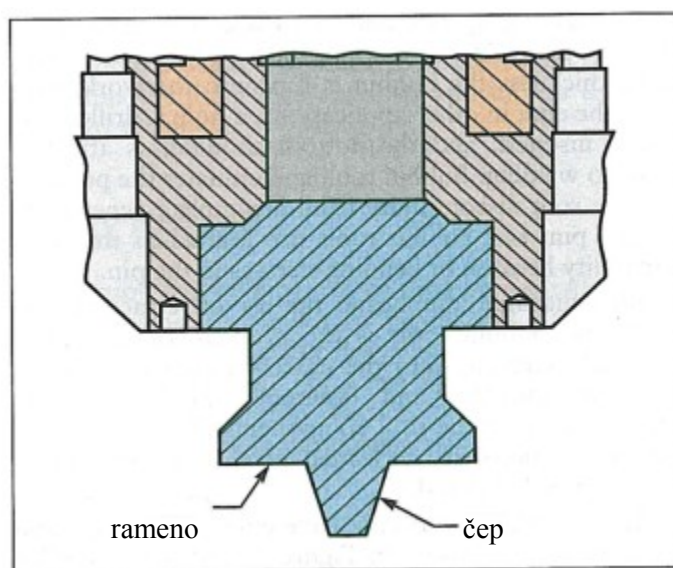
Ovládání

Třecí svařování je ovládáno buď pomocí softwaru založeném na principu řízení obráběcích strojů, nebo pomocí integrovaných funkcí zasazených do řídicího systému. Některé FSW řídicí systémy jsou založeny na ovládacích prvcích počítačových numerických CNC. Další stroje používají výukové seam-tracking (sledování pohybu sondy, nebo vizuální systémy k definici a kontrole dráhy svaru. Odchyšky obrobku, složitost dráhy, nářadí, průhyb stroje pod zatížením, a tepelné deformace obrobku jsou aspekty, které je třeba zvážit při posuzování a volby typu kontrolní metody. Každá kontrolní metoda použitá pro třecí svařování, musí být dostatečně přesná pro dané svařovací zařízení. Většina strojů pro třecí svařování je schopná kontrolovat buď síly, nebo pozice jako primární proměnnou hloubku ovládání, zatímco non-primární proměnná je sledována v poměru k rozsahu v přijatelných mezích.

Například, při kontrole síly zátěže, je uvedeno bodové zatížení sady, aby zabránilo nástroji vstupu do krycí desky, ale zároveň pojmulu předpokládanou maximální tloušťku materiálu. Někdy je používán obrácený proces s předem určenou cílovou pozicí, ale s limity minimální a maximální síly z důvodu ochrany stroje, FSW nástroje a nářadí. Když sekundární proměnná dosáhne nebo překročí meze, proces může být ukončen a dále varován operátor, nebo zastavena činnost k dosažení nastavených primárních hodnot. Většina softwaru pro řízení strojů umožňuje nastavení těchto limitů a přijetí ochranných opatření při dosažení nebo překročení mezních hodnot. Podobné typy metod kontroly zatížení, mohou být použity pro pohybující se osy. Je nastavena minimální a maximální hodnota zatížení. Během pohybu nástroje ve svaru můžeme zvýšit nebo snížit rychlost podle potřeby k udržení požadované hodnoty zatížení. [4]

2.4 Konstrukce nástrojů (trnů, sond)

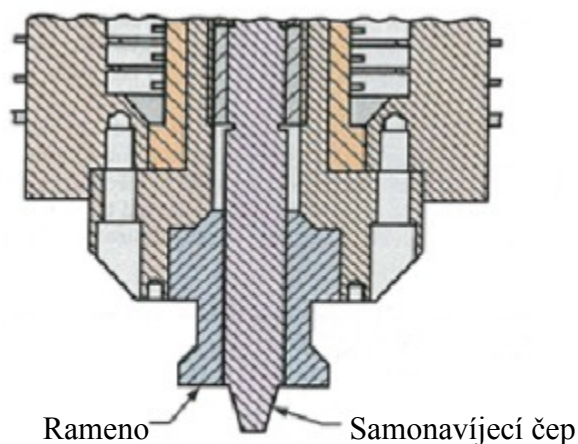
Tvar nástroje je u třecího svařování nejvýznamnější složkou tohoto systému a je obvykle navržen pro konkrétní typ svarového spoje. Nástroje jsou vyrobeny z materiálů odolných vůči opotřebení s dobrými statickými a dynamickými vlastnostmi při teplotě svařování. Musí mít velkou pevnost a odolnost proti opotřebení. Například, nástroje pro třecí svařování vyrobené z nástrojové oceli jako H13 běžně používané ke svařování AL slitin. Tři nejčastější varianty konstrukce nástroje jsou z jednoho kusu materiálu, sestávající z dvoudílného stažitelného čepu nástroje, a cívky nástroje. Jednodílný nástroj je monolitické konstrukce skládající se z čepu a ramena, jak je znázorněno na obrázku 5. Samonavíjecí-čep nástroje, je znázorněn na obrázku 6, umožňuje nezávislý pohyb čepu a ramena ve směru Z.



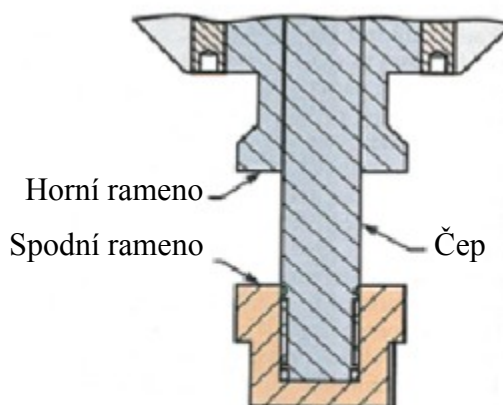
Obr.5 Jednodílný nástroj monolitické konstrukce skládající se z čepu a ramena [2]

Toto uspořádání umožňuje čep zasouvat na konci svaru tak že tím eliminuje otvor při výstupu ze svaru. Zasouvání hrotu nástroje umožňuje kontrolu jeho umístění vzhledem k podkladové desce, aby zajistilo plnou penetraci, na rameno můžeme působit potřebným tlakem bez ohledu na potřeby hrotu, a jsme relativně nezávislí na tloušťce svařovaného dílu. Vřeteno nástroje, jak je znázorněno na obrázku 7, má přední a spodní rameno. Tento nástroj umožňuje svařování větší rychlostí a eliminuje potřebu opěrné

desky. V některých případech pro dané tloušťky dílce je vřetenno spuštěno na obrobky od konce, v jiných případech je vyvrtán otvor, spuštěn hrot, a spodní rameno připojeno před svařováním. Vřetenno nástroje eliminuje možnost kořenové diskontinuity z neúplného pronikání hrotu, ale vřetenové nástroje mají omezené působení síly, z důvodu velkých ohybových napětí v hrotu.

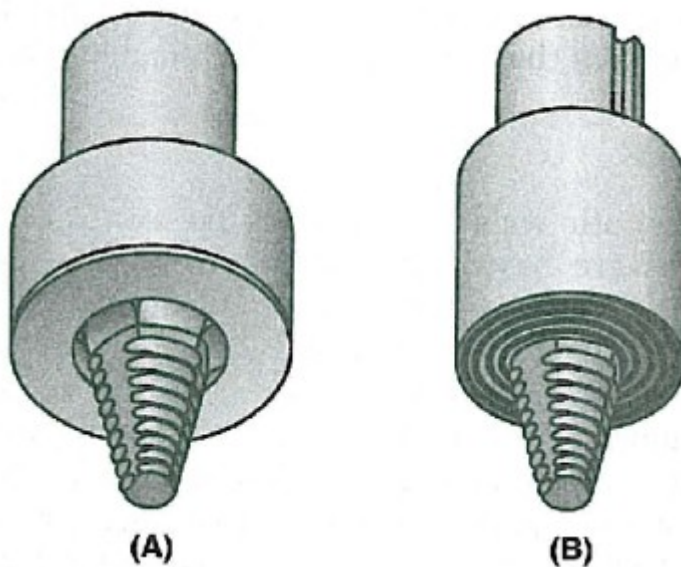


Obr. 6 Samonavíjecí-čep nástroje [2]



Obr. 7 Čep nástroje se spodním a horním ramenem [2]

Problém který komplikuje použití zatahovacích hrotů nástrojů a vřetenových nástrojů je problém vytlačování materiálu obrobku do úzkého prostoru mezi hrotem a ramenem a posléze jeho relativní pohyb mezi komponenty nástroje. Tyto části nástroje je třeba pravidelně čistit k odstranění extrudovaného materiálu. Ramena nástroje mají obvykle vydutou (konkávní) konstrukci, jak je znázorněno na obr. 8A, nebo spirálovitý tvar jak je znázorněno na obr. 8(B). Konkávní tvar náradí se běžně používá v jednom stupni volnosti do volného stupně náklonu úhlu (úhel tlačí), zatímco spirálové tvary obvykle pracují s nulovým náklonem, nakloněné uspořádání poskytuje zadní hraně nástroje zvýšenou přitlačnou sílu, pro zpětném promíšení materiálu. Tření spirály nutí materiál v „míchací zóně“ proudit dovnitř směrem k hrotu za účelem zvýšení tlakové síly. Čep nástroje má obvykle nějaký typ profilu např. obsahuje závitové prvky, fluidní profily nebo plošky. Tvar hrotu se liší v závislosti na materiálu a společné konfiguraci. Správně navržený nástroj třecího svařování musí mít schopnost udělat více než 1000 m (3280 ft) svarů, například na materiálu tloušťky 5mm (0,20 in.). Pro tlusté řady 5xxx a 6xxx slitin hliníku, je nutné přenastavit nástroj. [2,4]



Obr.8(A) vydutý konkávní tvar ramene, (B) spirálový tvar ramene [2]

2.4.1 Upínání

Upnutí svařovaného materiálu je obvykle nejsložitější a kritický aspekt celého procesu. Obrobky musí být upnuty k pevnému podkladu prismatické desce tzv. kováčnické a tím zajištěny před působením kolmé a boční síly, jež se vyvíjejí v průběhu svařování. Tyto síly mají tendenci zvedat a posouvat obrobky. Příslušenstvím pro upínání mohou být různé přípravky sloužící k omezení pohybu obrobku. Mezera pro kořen svaru nesmí překročit 10% tloušťky materiálu a toto platí do tloušťky asi 13 mm. Tyto přípravky udržují spáry mezi materiály co možná nejmenší, aby snížily zatížení upínacích komponentů. Je možné použít různé upínací varianty, ale vždy závisí na společné konfiguraci. Některé spoje jsou navrženy tak, aby obrobkům poskytovali nezbytnou podporu například T-spoj. Pokud je svislá část T-spoje dostatečné tloušťky, bude třeba udržet nástroj pouze v kolmé poloze.[4]



2.5 Svařovací parametry

Frikční svařování má čtyři základní parametry:

- pozice nástroje (nebo zatížení, v závislosti na typu řízení),
- otáčky vřetena min^{-1} ,
- rychlost posuvu,
- úhel náklonu nástroje.

Ostatní proměnné:

- příprava povrchu,
- vlastnosti materiálů, které mají být spojeny.

Pozice nástroje

Pozice nástroje (obvykle poloha tzv. Z-osy) je důležitý parametr. Tloušťka základního kovu a druh slitiny, jež jsou svařovány určují typ a stupeň úprav, provedených podle parametrů a konstrukce nástroje. Nástroj musí být umístěn na správném místě, aby byl zajištěn dostatečný kontakt s horní plochou obrobku. Nedostatečný tlak ramene na svařovaný materiál způsobuje ztrátu upevnění, která zapříčiňuje nesprávné recoalescence na zahřátém kovu pod nástrojem. Vznik póru na horní straně svaru je důkazem nedostatečné tlaku. Pokud je nástroj umístěn příliš hluboko obvykle se vyskytují tyto tři jevy: plocha svaru může být tenčí než základní kov, špička čepu je tažena po podkladové desce a v oblasti míchání můžeme dosáhnout solidu teploty a je definována jako teplota při které začíná tavení. Další diskuze o solidu teploty je k dispozici v následujících kapitolách. K tendencím umisťovat nástroj příliš hluboko, musíme postupovat opatrně, aby nedošlo k přehřátí materiálu v míchací zóně. Pokud materiál v této zóně, dosáhne solidus teploty, je protlačován pod míchací nástroj a může způsobovat pórovitost a to povrchovou nebo vnitřní.

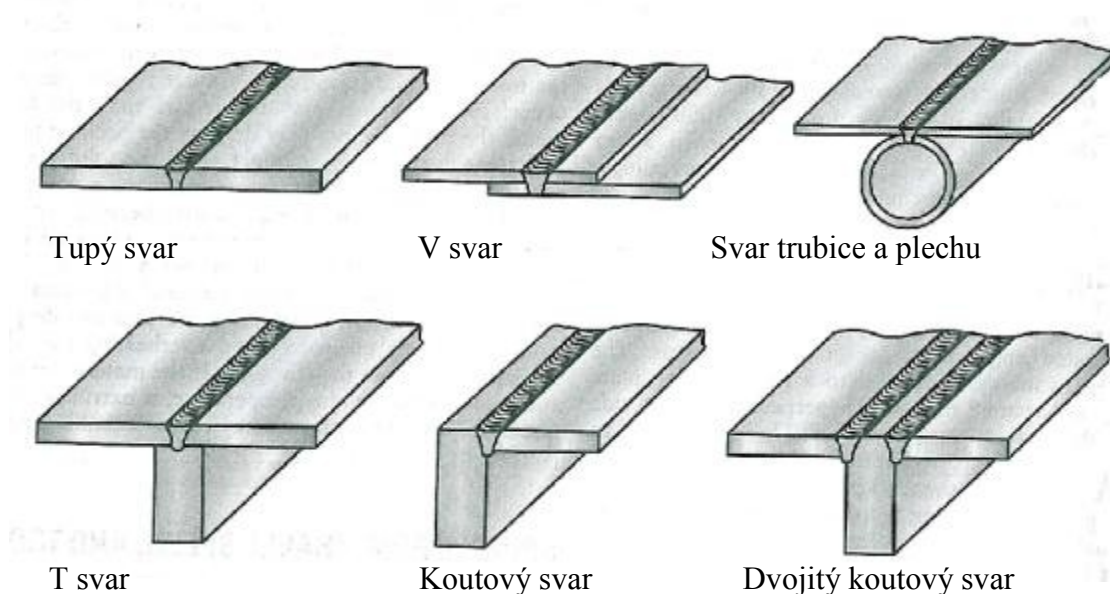
Otáčky vřetene, rychlost posuvu a úhel náklonu nástroje

Otáčky vřetene, rychlost posuvu, a úhel náklonu nástroje musí korepondovat s polohou nástroje. Vlastní otáčky vřetena a rychlost obvykle klesají s nárůstem tloušťky svařovaného materiálu a velikosti síly. Například při svařování vysokopevnostních hliníkových slitin se obvykle používá nižších otáček vřetene a rychlosti posuvu.

Úhel nástroje se běžně nastavuje na tzv. nulu (kolmo na svarovou dráhu) nebo pod mírným úhlem (1° až 3°). Tento náklon podporuje zpětné míchání materiálu z míchací zóny v zadní části nástroje. Na rozdíl od ramene s tzv. kovadlinkou používaného na nakloněné nástroje mají FSW nástroje, které pracují s nulovým sklonem obvykle rolovací (spirálovitý) tvar ramene, který se dotýká základního materiálu. Spirála zabráňuje deformaci materiálu a usměrňuje jeho pohyb směrem ke středu čepu.

Typy svarů

Třecí svařování s promíšením lze použít na řadu základních svarů, jak je znázorněno na obrázku 9. U každého druhu svaru musí být upínání navrženo tak, aby reagovala na působení sil nástroje FSW.



Obr. 9 Ukázka základních druhů svarů [2]



Příprava svařování

Frikční svařování vyžaduje obecně minimální přípravu před svařováním. Tento požadavek se však liší v závislosti na základním materiálu a mechanických požadavků na spoj. Obvykle postačuje očistit plochy budoucího spoje otřením. U některých tupých svarových spojů musí být s ploch odstraněny těžké oxidy, jelikož tyto oxidy mohou být vtaženy do svarového kovu.[16]

2.6 Oblasti třecího svařování

Vzhledem k tomu, že metoda FSW byla zprvu použita především na hliníkové slitiny, jsou různé oblasti svarů pojmenovány podle tvarů nacházejících se v mikroskopických pozorování svarů ve slitinách hliníku. Mělo by však být jasné, že podobné termíny jsou často používány u třecích svarů jiných materiálů, a že některé úkazy mohou chybět ve svarech jiných materiálů. Různé mechanismy mohou vést k odchylkám v mikrostruktuře podobně pojmenovaných oblastí v důsledku rozdílů v metalurgických vlastností obrobků. Různé oblasti (části) svarů třecího svařování jsou znázorněny na obrázku 10. Obrázek 10 (A) ukazuje makroskopické příčné části u svaru o tloušce 6,35 mm 6061-T651 hliníkové slitiny. Původy mikrostruktur svarů jsou popsány ve spodní části a označeny čísly. Důvod vzniku mikrostruktury v různých částech svaru je popsán v kapitole 3.[4]

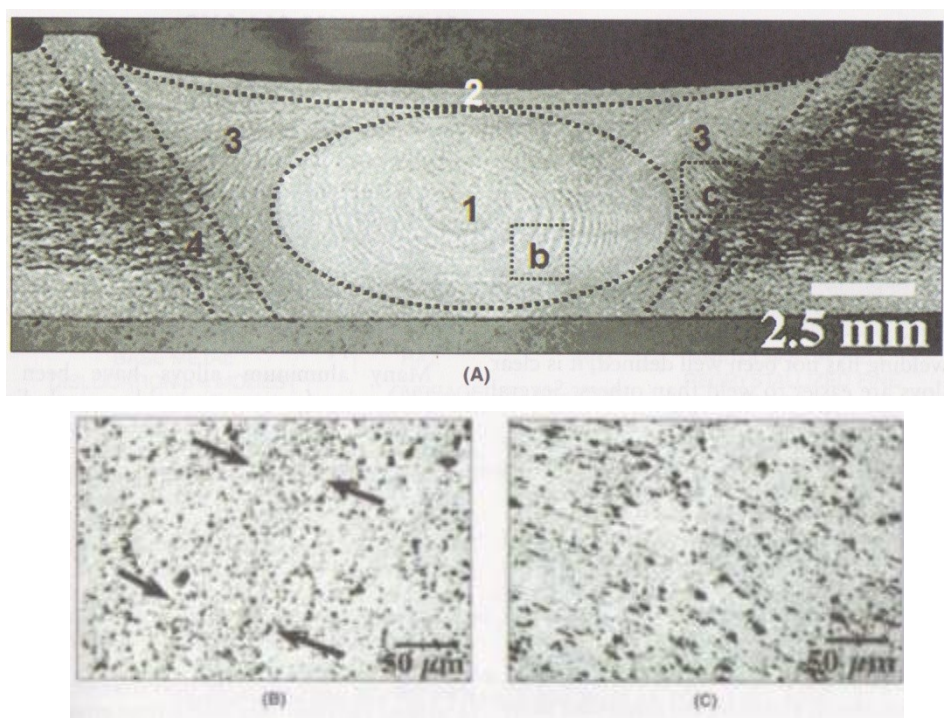
Oblast 1 míchací zóny je znázorněn na obrázku 10 (A), obsahuje relativně rovnoosé zrna, která jsou zpřesněna vzhledem k zrnům základního kovu. Míchací zóna obsahuje materiál, který byl při svařování nejvíce ve styku s nástrojem a lze předpokládat, že byl vystaven nejvyšší teplotě, největšímu napětí a deformačním rychlostem. Jako výsledek narušení míchací zóny se často zobrazí série soustředných kruhů, které mají konstantní rozteč, někdy nazývané „cibulový vzor“. Větší zvětšení mikrofotografie vzorku svaru z míchací zóny je znázorněno na obr. 10 (B), označen jako B na obr. 10 (A).

Oblast 2 tzv „rameního toku“ utvořená plohou ramene, je považována za součást míchací zóny. Obsahuje materiál, který byl silně ovlivněn přímou interakcí s ramenem nástroje.

Oblast 3 termomechanicky ovlivněná zóna (TMAZ) nebo tepelně a deformačně ovlivněná zóna (HDAZ), obklopuje zónu míchání a „rameního toku“. Jak je znázorněno

na obr. 10 (A), jsou zrna TMAZ, orientovány zpočátku ve válcovací rovině desky, a dále nataženy směrem vzhůru díky deformaci materiálu v míchací zóně. Nicméně jsou zrna ze základního materiálu zřetelnější. Vyšší zvětšení mikrofotografie ukazující deformaci a ohýbání zrn v TMAZ je znázorněno na obrázku 10 (C) (viz c na obrázku 10 (A)). U TMAZ věříme, že její maximální teploty a napětí byly nižší než v zóně míchání.

Oblast 4 se nachází nejdále od míchací zóny a je tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). V této oblasti dochází k působení vysokých teplot, které mohou způsobit některé metalurgické změny, přesto zde dochází k malé nebo žádné deformaci. Přítomnost posílených precipitátů v TOO slitinách hliníku není obecně zřejmé z mikroskopických pozorování s výjimkou malých rozdílů v kontrastu při leptání. U těchto slitin v TOO dochází ke zhrubnutí anebo stárnutí precipitátů. Důkazy o těchto změnách lze získat pouze pomocí transmisní elektronové mikroskopie (TEM) nebo detekcí změn mikrotvrdosti. U hliníkových slitin, které byly vylepšeny o zpracování za studena, můžou zrna v TOO podstoupit rekystalizaci a růst zrn. Konečná oblast je ovlivněna základním materiálem. Tato oblast byla bez výraznějších nárůstů teplot a nezaznamenala žádnou deformaci. Díky tomu, že vlastnosti základního materiálu nebyly změněny svařováním.



Obr.10(A) Makroskopický snímek řezu svaru Al slitiny 6061-T651, (B) detail míchací zóny,(C) detail s evidentním tokem materiálu.[4]



3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ SVAŘITELNOST

Tato část poskytuje přehled o třecím svařování zvláštních slitin, včetně slitin Al, Cu, Ti, oceli a austenitické oceli. Témata jako je svařitelnost, typy požadovaných nástrojů, a mikrostrukturní vývoj jsou diskutovány pro každou skupinu slitin. Máme k dispozici procesní parametry pro některé skupiny slitin a tudíž podklady pro jejich úspěšnou svařitelnost. Přestože není svařitelnost třecího svařování dobře definována, je zřejmé, že některé slitiny se svařují snadněji než ostatní. Několik faktorů, které můžeme zahrnout do definice svařitelnosti pro svařování třením:

- velikost procesního okna (rozmezí přijatelných svařovacích proměnných, které produkují kvalitní svary),
- maximální možná svařovací rychlost,
- rozsah výsledných sil,
- požadavky na nástroje.

Třecí svařování nejlépe pochopíme při pozorování teplotně-pracovního procesu používaného ke spojování. Zpracování za tepla, vyžaduje dosažení teploty vyšší než 50 až 60 % absolutní teploty tavení základních kovů, pro snížení napětí při toku materiálu. Schledáváme spojitost svařitelnosti při třecím svařování daného materiálu s lehkostí vytlačování kovu stejného materiálu. Proto hliník a slitiny hořčíku mají relativně dobrou svařitelnost, tudíž lze použít velké rychlosti svařování. Vzniklé síly působící na nástroj a svařovací stroj jsou poměrně malé, proto mohou být využity ocelové nástroje vzhledem k nízkým pracovním teplotám. Slitiny mědi jsou třecím procesem poněkud obtížně svařitelné, protože mají vyšší teplotu svařitelnosti a její rozsah, proto vyžadují použití nástrojů vyrobených ze slitin wolframu nebo niklu. Titan, ocel, nerezová ocel, a niklové slitiny jsou nepochybně náročněji svařitelné. Tyto vyžadují nástroje vyrobené z materiálů s mnohem vyšší teplotní odolností, jako jsou molybden (Mo), wolfram-rhenium (W-Re) nebo kubický nitrid bóru (CBN), a obvykle vyžadují pomalejší překročení doporučené rychlosti. Žárovzdorné slitiny jako molybden a wolfram nebyly třením úspěšně svařovány z důvodu nedostatku vhodných nástrojových materiálů.[17]



3.1 Materiály a jejich slitiny svařované metodou FSW

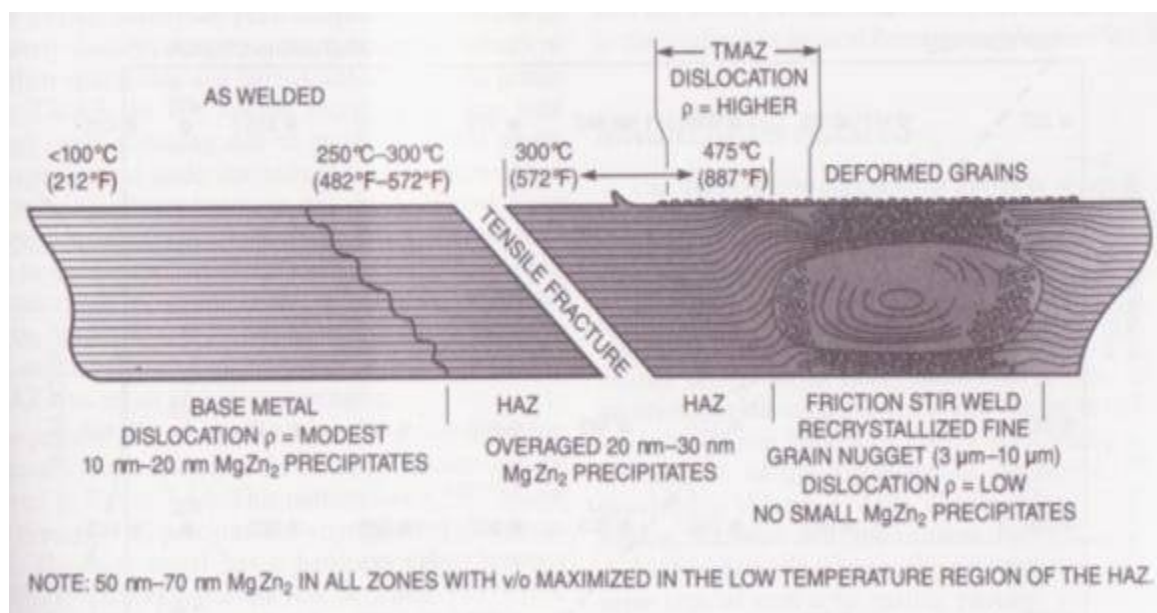
Slitiny hliníku

Hliníkové slitiny mají vysoký poměr hustoty a pevnosti současně poskytují dobrou protikorozi rezistenci v mnoha prostředích. V důsledku toho jsou často používány u konstrukčních aplikací závislých na hmotnosti v leteckém a dopravním průmyslu. Kubická plošně centrovaná (fcc) krystalová struktura těchto slitin poskytuje dobrou tažnost a houževnatost. Mnohé hliníkové slitiny byly úspěšně svařovány třecím svařováním, včetně 1xxx, 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx a řady slitin, několik slévárenských slitin, rychle zpevněných: hliník-železo-křemík-vanad (Al-Fe-Si-V) slitin, hliník-berylium (Al-Be) slitiny a Al-kovové matrice. Třecí svařování má velký potenciál ke spojování hliníkových slitin, které nelze úspěšně svařovat fúzními procesy, kvůli problémům s tuhnutím, krakováním a ztrátou vlastností v TOO. Hliníkové slitiny lze svařovat pomocí levných a obvyklých nástrojových materiálů, jako je nástrojová ocel. Jak již bylo zmíněno dříve, svařitelnost úzce souvisí s lehkostí vsunutí sondy do daných slitin. V důsledku toho, že 1xxx slitiny jsou lépe přizpůsobivé změnám svařovacích veličin: mají velkou škálu zpracování a mohou být svařeny rychle při nízkých silách. Slitiny 5xxx a 6xxx jsou o něco složitější svařitelnost, zatímco 2xxx a 7xxx slitiny mají nejtěžší svařitelnost z hliníkových slitin. Tento žebříček pozorně sleduje hodnocení vytlačovatelnosti. [16]

Mikrostruktura v jednotlivých oblastech svaru slitin hliníku se rozvíjí a vyvíjí podle místního termomechanického cyklu. Obecně lze v hliníkových slitinách posílit vytvrzování precipitací během stárnutí anebo tvářením za studena. Konečné mikrostruktury závisí na účinku termomechanických cyklů na původní mikrostruktury a mohou se rozvíjet prostřednictvím různých procesů, včetně rozpouštění, zhrubnutí a reprecipitace sraženin, stejně jako využití rekystalizace a zhrubnutí zrna. Změny v mikrostruktuře se odrážejí ve změnách v mikrotvrdosti a dalších mechanických a antikorozi vlastnostech. Obrázek 11 schematicky shrnuje některé z klíčových mikrostrukturních rysů třecích svarů, na hliníkových slitinách 7075-T651. Jsou zde

uvedeny místní teploty různých částí svaru. V míchací zóně se vytvořila nejvyšší maximální teplota, největší napětí a rychlost deformace. [4]

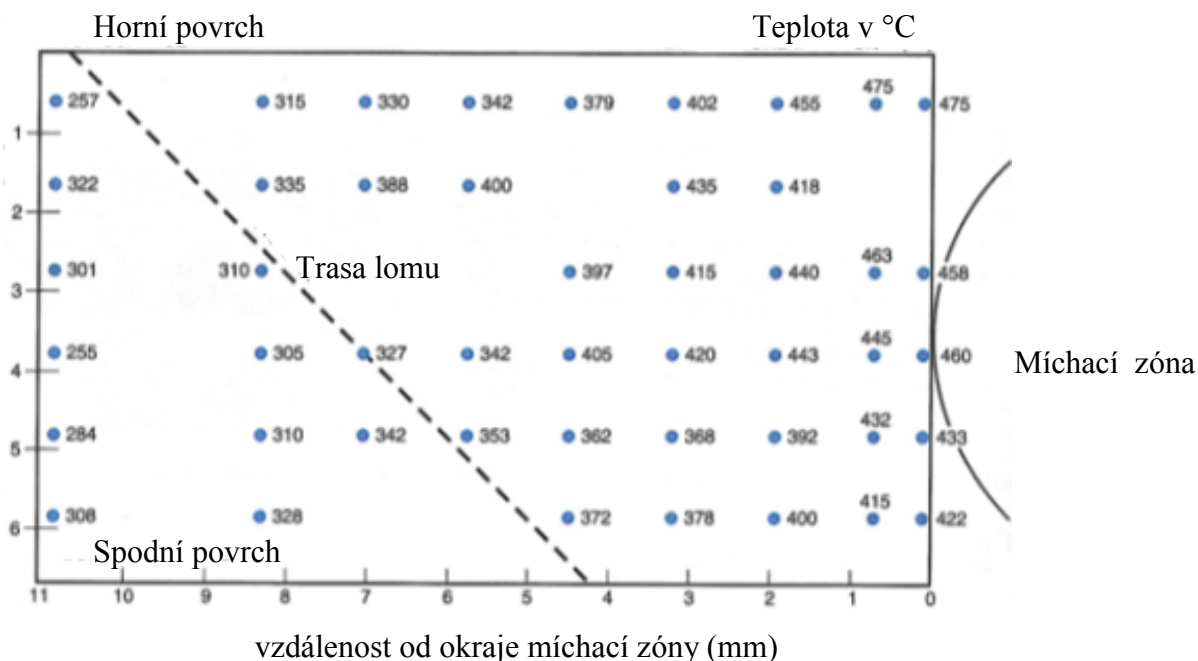
Maximální teploty v míchací zóně jsou obvykle vyšší než teplota Solvus pro posílení precipitátů, v důsledku toho se obvykle v míchací zóně precipitáty rozpustí během třecího procesu. Oblast TMAZ má spodní teploty, okolo 475 °C (887 °F) vzhledem k teplotám v míchací zóně. TMAZ má nižší teploty < 475 °C (< 887 °C), ve vztahu k míchací zóně a tím mnohem nižší napětí. Dislokační hustoty v TMAZ jsou větší, než ty v míchací zóně, jak je uvedeno na obrázku 11. TOO má ještě nižší teplotu 250 °C až 350 °C (482 °F až 662 °F). TOO tepelný cyklus způsobuje lokální stárnutí posílených precipitátů, jak je uvedeno na obrázku. Přerušená dráha pro tahové zkoušky těchto svarů je také patrná z obrázku 11. Při lomové zkoušce došlo k porušení materiálu vždy po kraji TOO, kvůli stárnutí precipitátů.[4]



Obr. 11 Schematicky shrnuje některé z klíčových mikrostrukturních rysů třecích svarů, na hliníkových slitinách 7075-T651 [5]

Jak je znázorněno na obrázku 12 vrcholné teploty měřené v míchací zóně se přiblížily 475 °C (887 °F) a klesají s rostoucí vzdáleností od okraje míchací zóny až do

přibližně 250 °C (482 °F) v TOO. Tepelný tok a maximální teploty jsou rozebrány podrobněji v sekcích - přenos tepla a tok materiálu, kapitola 3.2. [4]



Obr. 12 Průběh teplot od středu míchací zóny po její okraj u AL slitiny 7075-T651 [5]

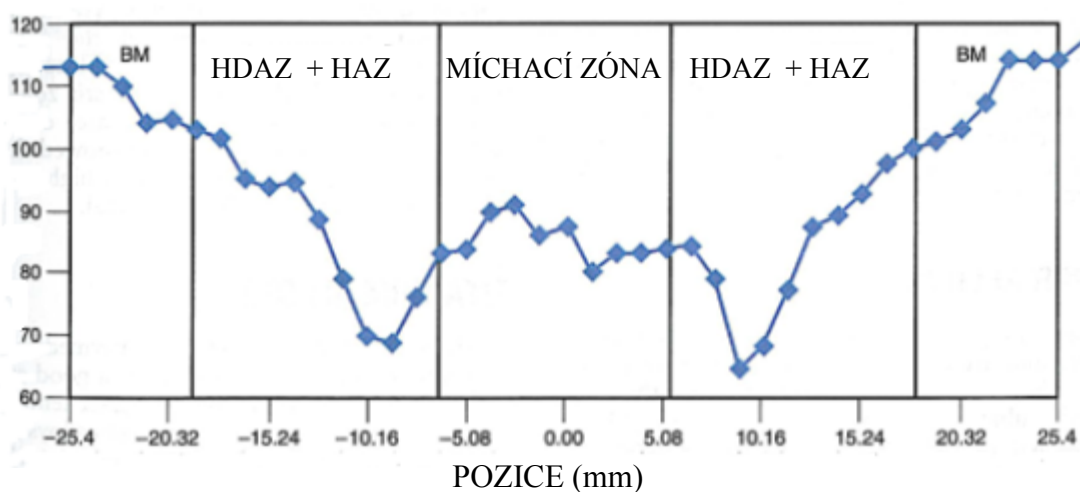
Rychlosti ochlazování jsou obvykle dostatečné na udržení většiny rozpuštěných látek v roztoku až k dosažení pokojové teploty. V důsledku toho je míchací zóna po ochlazení na pokojovou teplotu zpočátku přesycená rozpuštěnými látkami. V 6xxx slitin, a to zejména v 2xxx a 7xxx slitinách, míchací zóny můžou následně podstoupit přirozeného stárnutí při pokojové teplotě za vzniku nových precipitátů. Síla kovu v pásmu míchání může být také zvýšena pomocí umělého stárnutí při teplotách nad 100 °C (212 °F). [2]

Během třetího svařování, jsou i zrna v míchací zóně rafinována nějakým konzervačním procesem, který zahrnuje dynamickou obnovu a nebo dynamickou rekrytalizaci, v důsledku deformace způsobené svařováním. Nicméně, může být obnovena počáteční velikost zrna, zvýšená v důsledku růstu zrn během chlazení po průchodu nástroje. Rozestup mezi kruhy, které mohou být patrné v míchací zóně, je úzce spjatý se vzdáleností postupu nástroje za otáčku. Kroužky vypadají tak, že zahrnují alternativní oblasti jemných zrn rozptýlených mezi oblastmi s jemnějšími zrnky, jak je znázorněno na obrázku 10 (b). Precipitační hustota v jemnozrnných pásmech se také

může lišit od okolních oblastí. Rozdíly v zrnitosti můžou pramenit z rozdílů v napětí a rychlostí deformací, které se vyskytují v různých částech materiálu. Jak je vidět na obrázku 10 jsou intermetalické dispersoidy v nejlepších oblastech zrnitosti rozděleny a formují se do střídání pásem.

Nejvyšší teploty v TMAZ jsou příliš nízké, aby zcela rozpustily sraženiny, ale dostatečně vysoké, aby způsobit jejich zhrubnutí a jen částečné rozpuštění. Tyto zrna jsou smeteny vzhůru vlivem deformace v míchací zóně. Precipitáty v tepelně ovlivněné oblasti, projdou zhrubnutím a stárnutím, zatímco nízká teplota, zrna v tepelně ovlivněné oblasti překrystaluje. Oba procesy vedou ke ztrátě úměrné tvrdosti a pevnosti. Aplikování umělého stárnutí pro obnovu tvrdosti v míchací zóně může mít za následek další ztráty tvrdosti v TOO v důsledku dalšího zestárnutí.

Vzorek mikrotvrdosti v příčném řezu třecího svaru v 6061-T651 hliníku lze pozorovat na obrázku 13. Tento vzorek má "W" tvar a je typický pro všechny precipitačně zpevněné hliníkové slitiny. Základní kov má hodnotu tvrdosti mezi 110 HV a 115 HV. Tvrdost klesne na hodnotu mezi 65 HV a 70 HV v tepelně ovlivněné oblasti v důsledku zhrubnutí a stárnutí z posílené precipitace. Tvrdost stoupne na hodnotu mezi 80 HV až 90 HV v zóně svaru kvůli krátkému umělému ošetření stárnutím následného svařování. Tahové vlastnosti třecích svarů u hliníkových slitin jsou popsány v další části Mechanické vlastnosti třecích svarů.[4]



Obr. 13 Posun mikrotvrdosti napříč pásmy svaru AL slitiny 6061-T651 [6].



Slitiny hořčíku

FSW metodou jsou svařovány mnohé typy Mg slitin, včetně AM50, AM60B, AZ31B, AZ61, AZ91D a experimentálních slitin. Maximální teploty těchto slitin při svařování jsou v rozmezí od 325 °C do 450 °C, v závislosti na otáčkách a rychlosti pojezdu nástrojů. Slitiny hořčíku mohou být svařovány s nástroji z nástrojové oceli.

V jedné studii, oblastí třecí zóny hořčíkových slitin se ukázala rafinovaná zrnitost bez hrubých intermetalik. Věřilo se, že rafinované velikosti zrna vyplývají z dynamické rekystalizace, načež nebyl pro toto tvrzení předložen žádný důkaz. Diskutované intermetalické vměstky byly zřejmě rozpuštěny nebo rozmělněny interakcí s nástrojem. Pórovitost v zóně litého materiálu byla uzavřena třecím svařováním a primární pevné látky v polotuhé odlévané slitině byly vmíchány do míchací zóny. Pozorováním zrn v míchací zóně bylo zjištěno, že vykazují vysokou hustotu dislokací, a tyto zóny znázorňují preferované textury s některými krystalografickými rovinami nazývanými bazální roviny přizpůsobené směru rotace nástroje.⁹ Přechodové pásmo (TMAZ) může překrystalizovat a tím vykazovat určité rozpuštění intermetalik. Předpokládala se nízká tvrdost avšak oproti předpokladu došlo k nárůstu v míchací zóně, vzhledem k rafinaci velkých zrn a vyšší dislokační hustotě alfa fáze. Typické meze kluzu byly zaznamenány přibližně u 60% až 90% základních kovů, s pevností v tahu o 75% až 90% základního kovu. Bylo zaznamenáno, že textura má vliv na tahové vlastnosti.

Slitiny mědi

Maximální teploty v míchací zóně byly hlášeny až do 800 °C (1472 °F). Proto musí být nástrojové materiály zvoleny tak aby tyto teploty bez opotřebení nebo prasknutí zvládly. Nástrojové oceli, slinuté karbidy, keramika, a wolfram, molybden a super-slitiny niklu byly testovány jako nástrojové materiálů pro svařování mědi s těmito výsledky:

- 1: Nástrojová ocel - nedoporučuje se z důvodu rychlého a výrazného opotřebení.
2. Slinuté karbidy a keramika – nástroje mají tendenci ke snadnému zlomení.



3. Žárovzdorné kovy – vykazovaly opotřebení ale ne praskání.

4. Slitiny niklu - si vedly nejlépe, a to zejména Nimonic 105TM

Mikrostruktura v míchací zóně byla charakterizována značnou zrnitostí, pravděpodobně v důsledku klasického skládání dynamické rekrystalizace. Pozorováním svarové zóny transmisním elektronovým mikroskopem byla odhalena nižší hustota relativních dislokací na základní kov. Hodnota tvrdosti v míchací zóně byla závislá na podmínkách svařování. Zkouška tahem ukázala, že třecí svary slitin mědi, mají velmi vysokou mez pevnosti v tahu ve vztahu k základnímu kovu. [4]

Slitiny titanu

Některé titanové slitiny byly úspěšně svařovány pomocí třecího svařování, včetně Ti-6Al-4V, Ti-15-3 a Beta-21S. Reaktivita titanu, vysoké pracovní teploty, a velké síly vyžadují použití specializovaných nástrojových materiálů i přes jejich použití je opotřebení a deformace nástroje značná. Běžně používané nástrojové materiály pro třecí svařování titanových slitin patří slitiny molybdenu (TZM), wolfram, slitiny wolfram-rhenia, a W-Re obsahující hafnium-karbid (HfC).

Beta slitiny jsou nejsnáze použitelné k třecímu svařování, následované alfa-beta slitinami. Svařování rize komerčního (CP) titanu (α) se zdá být velmi obtížné, protože má šestiúhelníkovou (hcp) strukturu a vyšší tepelnou vodivost ve vztahu k ostatním třídám slitin. Zdá se téměř nemožné, vytvoření bezdefektního svaru v titanovém plechu (CP).[4]

Slitiny oceli

Ocelové slitiny představují jeden z nejběžnějších skupin konstrukčních materiálů. Tyto oceli mají levnou výrobu a jsou používány ve velké míře zejména v automobilním a lodním průmyslu. Svařovací studie byly provedeny na různých ocelích, včetně 1018, S355, DH-36, HSLA-65 a zušlechťených ocelích. Nástroje musí být vyrobeny z materiálů, které jsou schopny odolávat vysokým pracovních teplotám a které vykazují



vysokou pevnost a houževnatost při provozních teplotách. Příklady nástrojových materiálů, které byly úspěšně použity: wolfram-rhenium (W-Re) a polycrystalický kubický nitrid bóru (PCBN). Ochrana svaru inertním plynem je zapotřebí u W nástrojů, které jsou náchylné na křehnutí v důsledku obohacení kyslíkem a dusíkem z okolí. Inertní plyn také omezuje vstup plynů do svaru ocelového obrobku a zlepšuje tím estetiku svaru. Opotřebení nástrojů a jejich deformace může být stejná jak u nástrojů z nástrojové oceli. Vyšší napěťový tok a nižší tepelná vodivost spojená s horkou deformací ocelí v konečném důsledku znamená nutnost působení vyšší síly na nástroje a svařovací stroj a dále pomalejší posuv nástroje v dráze svaru na rozdíl od hliníkových slitin. Studie ukázaly, že svařovací proces ve feritických ocelích vzniká jednodušeji než u austenitických ocelí s ohledem na růst svařovací teploty, kde u feritických ocelí můžeme použít rychlejší posuv nástroje.[4]

Oceli 1018

Byly studovány třecí svary oceli 1018 vytvořené wolframovým nástrojem, a srovnávány rozměry nástroje před a po svařování. Tato měření ukázala, že k většině deformací a opotřebení došlo v průběhu zapichovací fáze. Částečný průnik byl usnadněn vytvořením vodícího otvoru, což vedlo k minimalizaci opotřebení nástroje v průběhu zapichovací fáze. Spojité měření a mikrostrukturní charakteristiky ukázaly, že maximální teplota v míchací zóně dosáhla austenitické fáze. Maximální teploty byly odhadnuty na více než 1100 °C (2012 °F) a můžou se přiblížit 1200 °C (2192 °F). Rychlosti ochlazování byly přibližně 5 °C/s až 10 °C/s ($\Delta T_{8-5} = \sim 50$ s až 60 s. Obrázek 14 ukazuje optický makrosnímek třecího svaru na 1018 oceli. Třecí svar v oceli oxidu manganu (C-Mn) například 1018 může vykazovat několik různých mikrostrukturních oblastí, včetně míchací zóny (podél osy svaru), oblast hrubého zrna kolem míchací zóny, oblast vytříbeného zrna (zahrnující oblast hrubých zrn), stejně jako interkritickou oblast a podkritickou oblast.[4]



Obr. 14 Makroskopický snímek oceli 1018 [7]

DH-36

Třecí svar na oceli DH-36 s W-Re nástrojem byl vytvořen hned několika výzkumnými pracovníky. Mikrostruktura míchací zóny obsahuje zrna polygonálního feritu velikosti 5 μm . V míchací zóně nebyly pozorovány žádné oblasti martensitu. V TOO se vyskytovaly zóny které obsahovaly částečně neostrý perlit, ale žádné hrubé zrna nebo oblasti vybranných zrn. Mikrotvrdość v míchací zóně průměrně dosahuje 215 VHN, zatímco u základního kovu byl mezi 190 VHN a 195 VHN. Díky absenci martensitu, nebylo možné prokázat rozsáhlé zpevnění ve výsledcích mikrotvrdości. Svarové vzorky ukázaly přijatelnou deformaci ve vztahu k selhání pevnosti v tahu, vyšší než u základního kovu.[4]

HSLA-65

Studie třecího svařování ocelí HSLA-65 poskytují podobné výsledky jako u testu oceli DH-36. Přijatelné hodnoty vrubové houževnatosti dle Charpyho (CVN) uvedené pro tyto svary, z neznámých důvodů byly zaznamenány velké rozptyly v naměřených hodnotách. Při testování korozivzdornosti v solné komoře, nebyly prokázány žádné preferenční koroze na těchto svarech. Tepelně ovlivněné oblasti u dvojfázových třecích svarů zušlechtěné oceli, vykazovali sníženou tvrdost v důsledku překalení. Tvrdost po prvním průchodu byla nižší oproti tvrdosti po druhém průchodu kvůli temperování druhého průchodu. Tahové zkoušky ukázaly ~70% pevnosti v tahu. Test CVN ukázal, že míra houževnatosti těchto svarů je na přijatelné úrovni.[2,4]



Austenitické oceli

Slitiny nerezových ocelí poskytují užitečnou kombinaci pevnosti a odolnosti proti korozi. Existuje pět hlavních kategorií nerezových ocelí, které jsou klasifikovány podle jejich mikrostruktury při pokojové teplotě. Většina třecích svarů byla u nerezových ocelí provedena na austenitických ocelích, včetně 304, 316 a AL6-XN podle AISI. Tato třída oceli není zušlechťována tepelnou úpravou.[2,4]

3.2 Přenos tepla třením

Míchání svaru

Tepelné cykly se setkávají podle druhu materiálu v místě a okolí oblasti svaru. Mají velký vliv na konečné mikrostruktury, mechanické vlastnosti, zbytková napětí a deformaci svařence. Ke klíčovým vlastnostem místního tepelného cyklu, které mají největší účinek, patří maximální teploty a rychlost ochlazování. V této sekci jsou přezkoumávány různé modely, které byly použity pro simulaci proudění tepla a tepelných cyklů během FSW. Již publikované výzkumy pokusů na měření teploty v průběhu TSP jsou nadále zkoumány.

Vodivé a konvekční přenosy tepla

Vzhledem k tomu, že dochází u nástroje k rozsáhlé plastické deformaci, je přenos tepla v blízkosti nástroje převážně konvektivní. Proto musí být účinky deformace vzaty do úvahy pro přesnější modelování. Primárně existují dva přístupy k modelu deformace. Jedním z nich je použití pevné mechaniky, což zahrnuje ve většině případů analýzu metodou konečných prvků. Další možností je zacházet s deformací visco-plastického tečení u materiálu s vysokou viskozitou, což spadá do kompetence výpočtů problematiky dynamiky tekutin (CFD). Je třeba vzít v úvahu deformace z ohřevu (v sušině) nebo viskózní ztráty (v tekutinách) v obrobku na rozdíl od povrchového ohřevu při kterém je teplo vedené do modelu.



3.3. Měření teploty

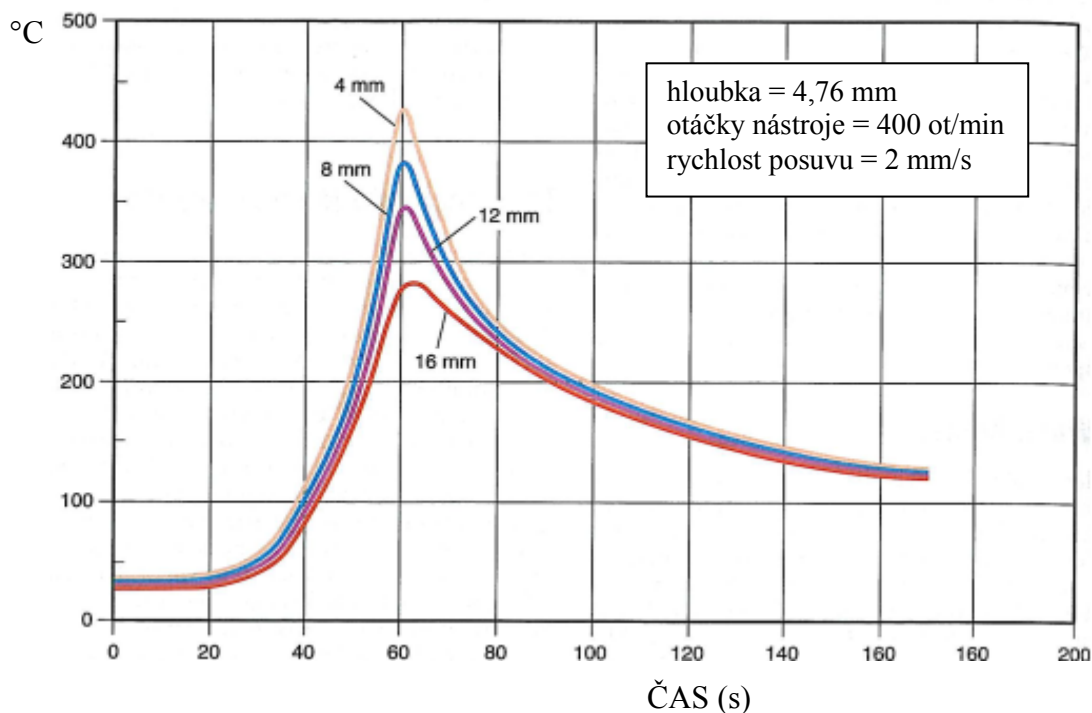
Teploty

Bylo popsáno mnoho experimentů zaměřených k určení teploty na různých místech třecího svaru. Většina z těchto experimentů se týkala termočláňkového měření. V této části jsou vybrané termočláňkové měření projednávány spolu s metodou pro odvození maximální teploty v Al slitinách s pozorováním mikrostruktury.[4]

Měření Termočláňků

V jedné studii byly zaznamenány maximální svařovací teploty v průběhu třecího svařování při pokusech na Al slitinách nižší než teplota solidu slitiny. Maximální teploty $\sim 450^{\circ}\text{C}$ ($\sim 842^{\circ}\text{F}$) byla naměřena v míchací zóně třecího svaru provedené na 400 rpm na 6,4-mm (0,25 in.) 6061 hliníku. Obrázek 15 ukazuje reprezentativní tepelné cykly. Maximální teploty v zóně míchání poblíž sondy byly téměř izotermické a vrchol teplotního gradientu přes tloušťku desek byl malý. Žádný teplotní rozdíl nebyl zjištěn mezi postupujícími stranami a ustupujícími stranami. Maximální teploty byly zjištěny se zvyšujícími se otáčkami nástroje za minutu a zvyšujícím se tlakem nástroje.

V jiné studii byly hlášeny maximální teploty 475°C (887°F) v blízkosti hranic míchací zóny a TMAZ v 7075 hliníku. Teploty v tepelně ovlivněné zóně v rozmezí od 250°C (482°F) a 475°C (887°F), což způsobuje zestárnutí, zhrubnutí a posílení precipitátů. (Viz obr. 11 pro ilustraci v zóně mikrostruktury svaru, rozdělení sraženiny a teplotní rozsahy třecího svařování na 7075 hliníku.)



Obr. 15. Ukázka reprezentativních tepelných cyklů. [9]

Al_2Cu částice přítomné v 2219 hliníku byly použity jako in-situ senzory pro eutektické tavení za účelem vázání teploty během třecího svařování této hliníkové slitiny mědi. Výše uvedená slitina obsahuje alespoň 6,3% mědi, tento obsah mědi je vyšší než maximální rozpustnost v tomto solidu systému. Eutektická teplota pro tento systém je 548°C (1018°F). Nemáme poznatky o tavení eutektika, jenž by bylo pozorované v pásmu míchání nebo TMAZ těchto svarů. Což potvrzuje, že špičkové teploty byly pod eutektické a že neexistovaly kapalně fáze během třecího svařování.

Toky materiálu při třecím svařování

Při svařování třením dochází k pohybu značného množství viskózního materiálu kolem nástroje, následuje recoalescence materiálu v blízkosti zadní části nástroje. Porozumění toku materiálu během FSW je důležité poznat nejméně dvě podmínky. Za prvé, svařovací podmínky, které produkují některé nežádoucí proudění kapalin mohou vést k tvorbě nespojitostí, jako "Wormhole" a „diskontinuity“. Za druhé, pohybující materiál nese teplo a to může mít vliv na tepelný cyklus. [4]



4 VLASTNOSTI SVAROVÝCH SPOJŮ - VZORKŮ

Hliník – Aluminium (Al)

Je lehký, stříbrně šedý kov vyznačující se dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí. Mezi jeho další vlastnosti patří výborná tvárnost, dobrá svařitelnost, výborná korozivzdornost, relativně velká pevnost v poměru k měrné hmotnosti, nezanedbatelné jsou také jeho antistatické vlastnosti, nemagnetičnost a snadná recyklace. Hliník, jakožto dobrý vodič elektrického proudu, je hojně používán v elektrotechnickém průmyslu. Dále je čím dál častěji využíván ve strojním, automobilním a leteckém průmyslu ve formě lehkých a pevných slitin, jejímž nejvýznamnějším zástupcem se stal dural.

Hliník je nejrozšířenějším kovovým prvkem v zemské kůře, jeho procentuelní zastoupení je dle posledních měření cca 7,3 – 8,5%. Ve volné přírodě se však s hliníkem setkáme jen ve formě sloučenin, protože je jako prvek velmi reaktivní. Jeho nejznámější rudou je bauxit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), dihydrát oxidu hlinitého, potřebný k výrobě surového hliníku. Další, pro průmysl neméně významnou rudou, je kryolit (Na_3AlF_6), hexafluorohlinitan sodný, který se používá pro snížení teploty tání oxidu hlinitého při elektrolytické výrobě hliníku. Minerály na bázi Al_2O_3 , oxidu hlinitého, jsou vzácné, drahé a pro své vlastnosti ceněné. Čistý oxidu hlinitý se nazývá korund, jeho tvrdost je na Mohsově stupnici na 9. místě, což z něj dělá druhý nejtvrdší nerost po diamantu. Korund se také vyskytuje ve formě rubínu, jehož červená barva je způsobena příměsí chromu, a dále ve formě safíru, jehož modrá barva je zase zapříčiněna příměsí titanu a železa. Safír i rubín mají významné využití v technice: safírové hroty se používají v nejpřesnější měřicí technice, rubín sloužil k sestrojení prvního laseru a dodnes se rubín i safír v laserové technice využívá. [12]

Označení slitin hliníku

Označení slitin podle použití: EN AW – tvářené výrobky, EN AB – nelegované nebo slitinové ingoty pro přetavení, EN AC – odlitky, EN AM – předslitiny.

V současnosti platná norma ČSN EN 573-1 až 3 pro tvářené výrobky a ingoty určené ke



tváření stanoví označování znaky **EN AW-xxxx**, kde x je číslice. Předpona EN značí normu, následuje mezera, písmeno A označuje hliníkovou slitinu, písmeno W určuje skupinu tvářených výrobků, následuje spojovací čárka a čtyřčíslí určující chemické složení slitiny. První číslo v čtyřčíslí označuje skupinu slitiny podle hlavního legujícího prvku. Za čtyřčíslím následuje bližší označení výrobku – jeho stav a druh zpracování.

Rozdělení skupin:

skupina 1000 – technický hliník ($Al > 99\%$)

skupina 2000 – slitina Al-Cu

skupina 3000 – slitina Al-Mn

skupina 4000 – slitina Al-Si

skupina 5000 – slitina Al-Mg

skupina 6000 – slitina Al-Mg-Si

skupina 7000 – slitina Al-Zn

skupina 8000 – slitina Al s různými prvky [10]

4.1 Volba materiálu vzorků

Vzorky pro posouzení svarů byly vyrobeny ze slitiny hliníku EN AW 5083 (AlMg4,5Mn0,7). Tato slitina se nejčastěji používá v lodním průmyslu zejména v mořské vodě.

5xxx (skupina 5000)

Použitím hořčíku jako hlavního legujícího prvku, případně hořčíku s manganem, dosáhneme dobře obrobitelné, středně až vysokopevné hliníkové slitiny. Hořčík je podstatně efektivněji zpevňující prvek než mangan. Množství kolem 0,8% Mg je z hlediska zpevnění srovnatelné s 1,25% Mn, navíc lze do hliníkových slitin přidávat mnohem větší množství hořčíku než manganu. Slitiny této řady jsou dobře svařitelné a jsou odolné proti korozi.



Tabulka 1: Značení použitého experimentálního materiálu [11]

Německo DIN	Materiál čís.	ISO/EN norma	USA	Velká Británie BS	Francie NF	Španělsko UNE	Itálie UNI	Švédsko SIS
AlMg4,5Mn0,7	3.3547	5083	5083	N8	5083	L3321	7790	4140

Tabulka 2: Chemické složení [11]

Slitina	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Jiné	Al
EN AW 5083	0,4	0,4	0,1	0,4 - 0,1	4,0-4,9	0,05 - 0,25	0,25	-	0,35	zbytek

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti použitého experimentálního materiálu [12]

Slitina	Min. povolená mez kluzu R_p 0,2 (N/mm ²)	Min. Pevnost v tahu R_m (N/mm ²)	Min. Tažnost A_5 %	Tvrdost podle Brinella HBS	Měrná hmotn- ost g/cm ³	Tepelná vodivost W/cm x K	Koeficient tepelné rotažnosti Cm x K (20-100°C)	Svařitelnost	Teplota tavení/ interval °C	Modul elastici- ty KN/mm ²
5083	125	275	12	75	2,66	1,1- 1,2	0,25	vynikající	580- 640	71

Problematika svařování slitin hliníku

Během svařování hliníkových slitin se setkáváme s několika jevy, které jsou společné pro všechny hliníkové slitiny nezávisle na chemickém složení. Tyto jevy vyplývají z fyzikálních a chemických vlastností hliníku (tepelné vodivosti, tepelné rotažnosti, vysoké reaktivitě hliníku, afinitě ke kyslíku etc.) a mají nepříznivý vliv na tvorbu svarového spoje a jeho výslednou pevnost a vnitřní strukturu. Mezi nejpodstatnější jevy patří:

- Pórovitost svarů – vznik bublin vodíku uvnitř svaru.
- Přítomnost zoxidované povrchové vrstvy Al_2O_3 .
- Vznik trhlin ve svaru (solidifikační, likvací trhliny).
- Pokles pevnosti ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti (TOO).
- Neměnnost barvy hliníku se stoupající teplotou – obtížně viditelná tavná lázeň.



- Při tavení rychle přechází do tekutého stavu –krátký interval tuhnutí.

FSW se používá pro svařování např. panelů pro paluby, bočnic, přepážek, podlah, hliníkových lišt, trupů, pro nástavby, stožáry, chladicí zařízení a další. Právě metoda FSW je vhodná alternativa za metodu MIG (131), které je produktivní, všestranná a v loděařství se používá pro svařování hliníkových slitin. Avšak má dvě nevýhody: deformace základního materiálu a snížení pevnosti v TOO. Stejně tak i metody TIG (141) a plazmové svařování, které jsou široce využívány, mají stejné nevýhody. U svařování FSW tyto dvě nevýhody odpadají.[11]

4.2 Základní zadání a vyhodnocení vzorků

Cílem vykonaných experimentů bylo poukázat na vliv vybraných parametrů svařování (geometrie, materiál svařovacího nástroje, směr otáček nástroje, rychlost svařování...) na celistvost, formování svaru případně živostnost nástroje.

Byla zadána výroba 14 vzorků svarů. Vzorky 1-12 z výše uvedené slitiny a vzorky 13,14 z konstrukční oceli. Tabulka č.4 udává parametry použité při výrobě vzorků.



Tabulka 4: Použité parametry

Ozn.	Použité parametry			Tloušťka materiálu	Pozn.	Materiál
	Otáčky [RPM]	Rychlost posuvu [mm/min]	Typ nástroje			
1	600 RPM levotočivé	60 mm/min	Typ 1	10 mm	Celistvý ZS	AlMg _{4,5} Mn _{0,7} (EN AW 5083)
2	600 RPM levotočivé	60 mm/min	Typ 2	10 mm	Trhlina v ZK	
3	600 RPM levotočivé	200 mm/min	Typ 1	10 mm	Trhlina v ZK	
4	600 RPM pravotočivé	200 mm/min	Typ 1	10 mm	Trhlina v ZK	
5	600 RPM levotočivé	60 mm/min	Typ 1	16 mm	Celistvý ZS	
6	600 RPM levotočivé	300 mm/min	Typ 1	16 mm	Trhlina v ZK	
7	600 RPM levotočivé	120 mm/min	Typ 3	6 mm		
8	800 RPM levotočivé	120 mm/min	Typ 3	6 mm		
9	400 RPM levotočivé	120 mm/min	Typ 3	6 mm		
10	600 RPM levotočivé	80 mm/min	Typ 3	6 mm		
11	600 RPM levotočivé	160 mm/min	Typ 3	6 mm		
12	600 RPM levotočivé	160 mm/min	Typ 4	6 mm		
13	400 RPM levotočivé	200 mm/min	Typ 5	2 mm	Celistvý ZS	ocel
14	400 RPM levotočivé	200 mm/min	Typ 6	2 mm	Defektní ZS	ocel

**Typy nástrojů:**

Typ nástroje 1: Členitý válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem. Průměr ramene Ø24mm x Ø11mm(průměr kolíku v kořeni).

Typ nástroje 2: Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem. Průměr ramene Ø24mm x Ø11mm(průměr kolíku v kořeni).

Typ nástroje 3: Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem. Průměr ramene Ø15mm x Ø6mm(průměr kolíku v kořeni).

Typ nástroje 4: Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a válcovým kolíkem. Průměr ramene Ø15mm x Ø6mm

Typ nástroje 5: WC_ Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a válcovým kolíkem. Průměr ramene Ø12mm x Ø4mm

Typ nástroje 6: WRe_ Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a válcovým kolíkem. Průměr ramene Ø10mm x Ø4mm

Tabulka 5 porovnává svařené vzorky. Detailní rozbor v kapitole 4.3.

Tabulka 5: Porovnání vzorků.

Ozn.	Sledovaný záměr	Pozn.
1 a 2	Vliv geometrie nástroje na celistvost svaru	Vzorek 2. Kanál podél svaru na PS
3 a 4	Vliv směru otáček na celistvost svaru	Vz.3: Kanál podél svaru na PS, blíž k vnějšímu povrchu Vz.4: Kanál podél svaru na ÚS blíž k spod. povrchu
1, 3 a 6	Vliv rychlosti svařování na celistvost svaru	S narůstající rychlostí se defekt (kanál) indikovaný na PS zvětšuje
7, 8 a 9	Vliv rychlosti otáček na formování svaru	Na povrchu svaru vznikají “žmolky“ s narůstající rychlostí otáček
7, 10 a 11	Vliv rychlosti svařování na formování svaru	
11 a 12	Vliv geometrie nástroje na životnost nástroje	V případě použití nástroje s válcovým kolíkem došlo k jeho zlomení, naopak kuželový kolík stejné parametry zvládl.
13 a 14	Vliv materiálu nástroje na jeho životnost	Každý materiál nástroje je vhodný pro vlastní parametry svařování a v jiném případě dochází k výraznému opotřebení nástroje.



4.3 Provedené zkoušky svarů

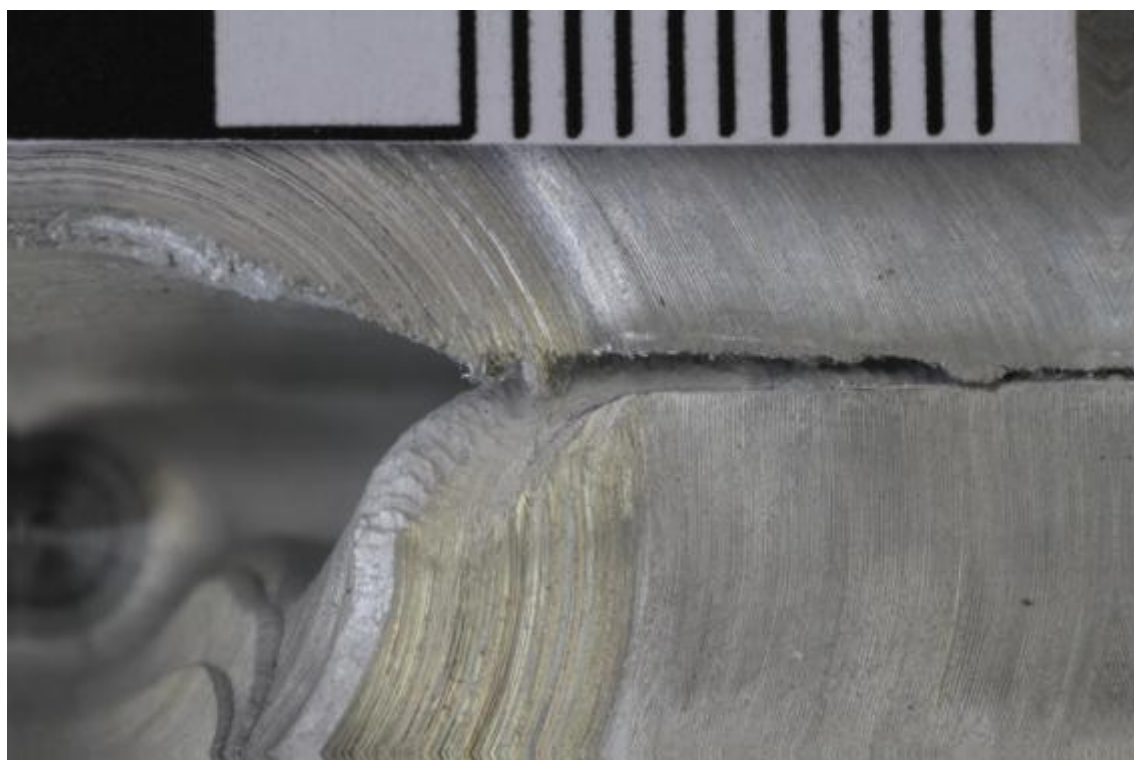
Svařené vzorky 1 a 2 - tupý svar



Obr. 16 Vzorek č. 1 ve spodní části bez defektu. Vzorek č. 2 v horní části patrná trhlina, Slitina Al tl.10mm.



Obr. 17 Vzorek č.2



Obr. 18 Vzorek č.2, detail počátku vady.



Obr. 19 Vzorek č.2, detail výstupního otvoru s vadou.

Vzorek 1 byl podroben zkoušce makrostruktury a mikrostruktury svarového spoje.

Protokol P/876/13.

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-1/M je po naleptání leptadlem Adler – Matting je bez vad, (obr 20).

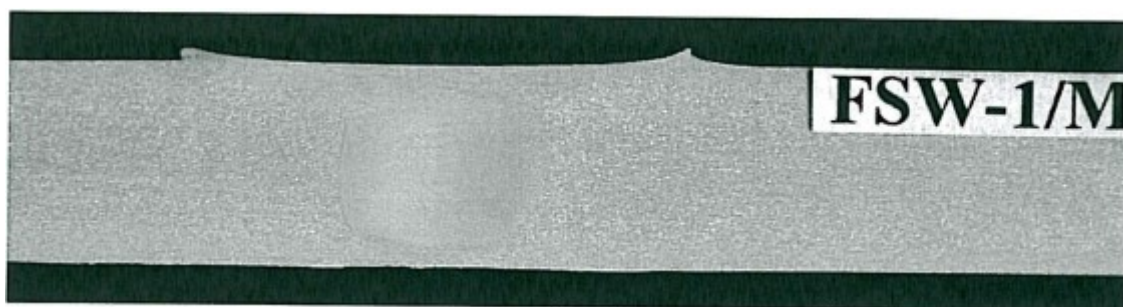
Mikrostruktura

(lept. 2% HF)

Mikrostruktura svarového kovu je tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obrázek 21).

Mikrostruktura TOO u hranic ztavení je řádkovitá, tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obr 22).

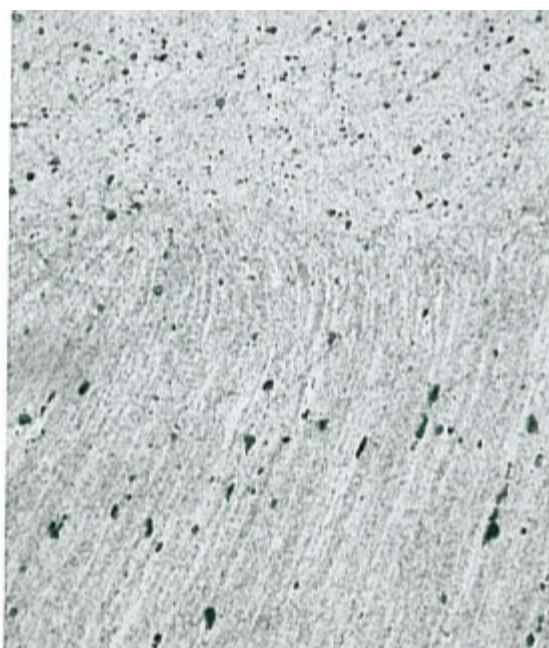
Mikrostruktura základního materiálu je řádkovitá, tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obr 23).



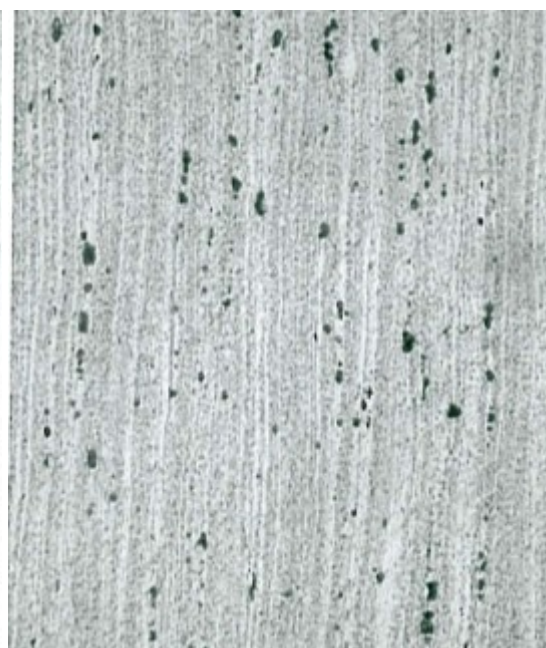
obr. 20 Makrostruktura vz. č. 1 zvětšeno 3x



Obr. 21 Mikrostruktura svarového kovu je tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si



Obr. 22 Mikrostruktura TOO u hranic ztavení



Obr. 23 Mikrostruktura zákl. materiálu



Svařené vzorky 3,4 - tupý spoj



Obr. 24 Vzorky 3 a 4 (z prava), slitina Al tl. 10mm.



Obr. 25 Vzorek 3 detail trhliny.



Obr. 26 Vzorek 3 a 4- kořen svarů (z prava).

Svařené vzorky 5,6 - přeplátovaný spoj



Obr. 27 Vzorky 5 a 6 (z prava), slitina Al tl. 16 mm.



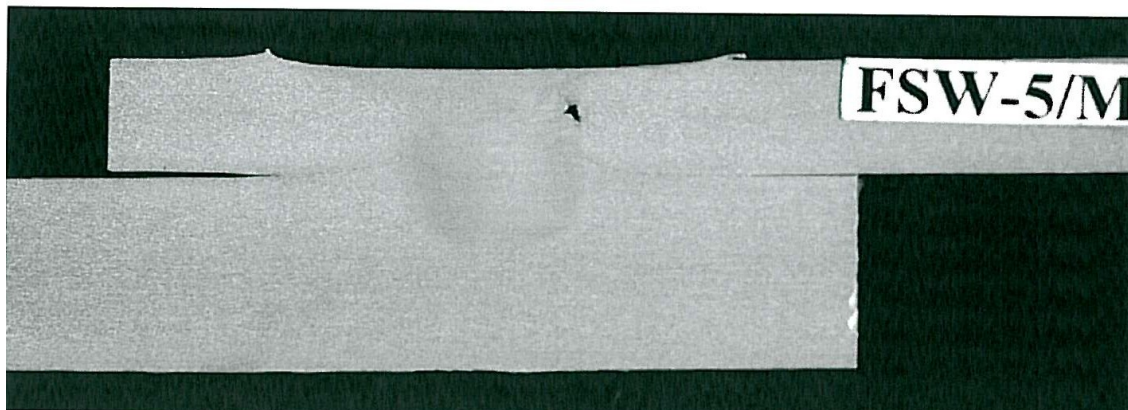
Obr. 28 Vzorek č. 6 detail trhliny.

Vzorek 5 byl podroben zkoušce makrostruktury a mikrostruktury svarového spoje.

Protokol P/876-1/13

Makrostruktura

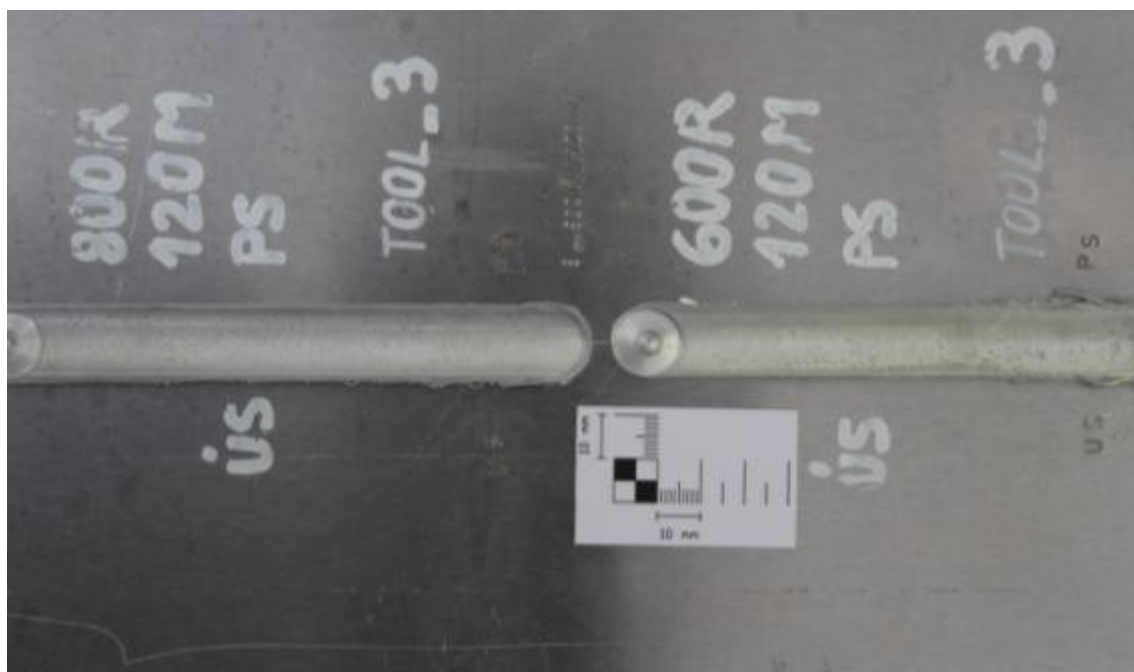
Makrostruktura vzorku č. FSW-5/M vykazuje po naleptání leptadlem Adler – Matting dutinu $h = 1,0$ mm (obr. 29)



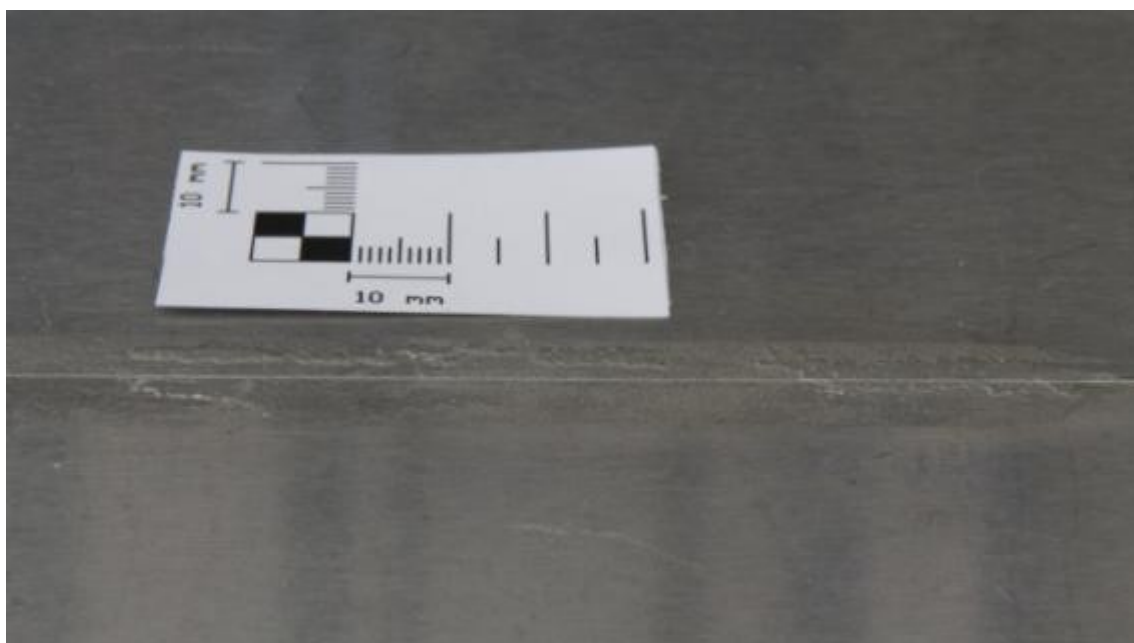
Obr. 29 Makrostruktura vzorku č. 5 vykazuje dutinu.



Svařené vzorky 7, 8 - tupý spoj



Obr. 30 Vzorky 7 a 8 (z prava), slitina Al tl. 6 mm.



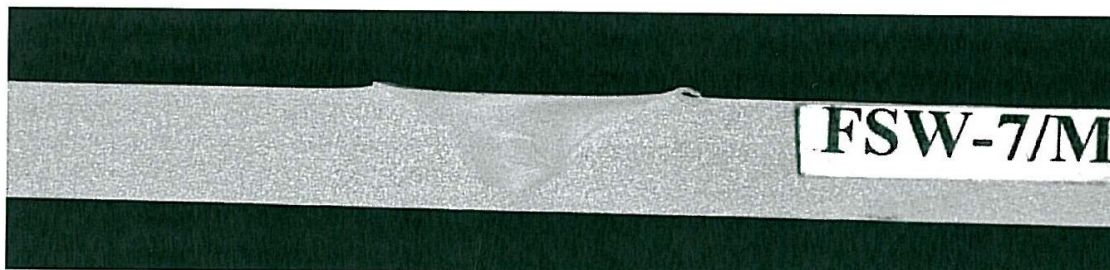
Obr. 31 Vzorek 8 kořen svaru.



Vzorek č.7 byl podroben zkoušce makrostruktury svarového spoje. Protokol P/876-2/13

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-7/M vykazuje po naleptání leptadlem Adler – Matting svar bez vad (obr.32)



Obr. 32 Makrostruktura vzorku č. 7- svar bez vad.

Svařený vzorek č. 13 – tupý svar



Obr. 33 Vzorek č. 13, ocel tl. 2 mm.



Obr. 34 Vzorek č. 13 detail výstupního otvoru.

Vzorek č. 13 byl podroben zkoušce makrostruktury a mikrostruktury svarového spoje
Protokol P/876-3/13

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-13/M vykazuje po naleptání HNO_3 studený spoj $h = 4,3 \text{ mm}$ (obrázek 35, 36).

Mikrostruktura (lept. 4% HNO_3)

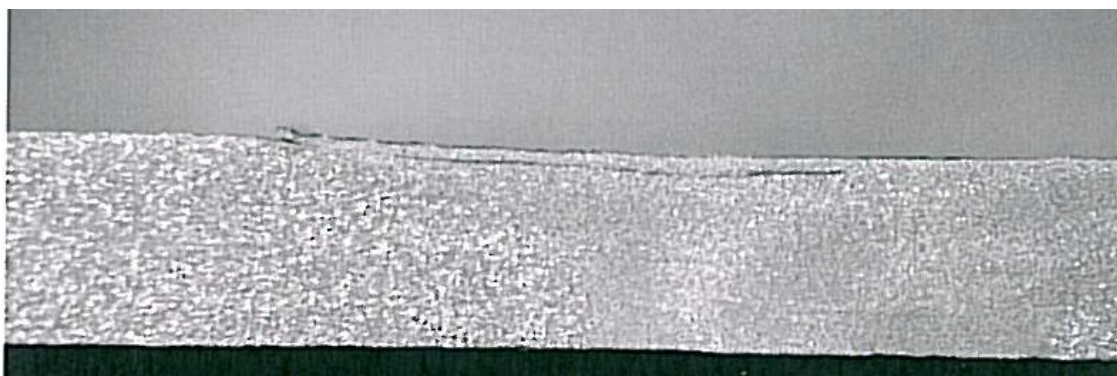
Mikrostruktura svarového kovu je tvořená feritem a vyloučenými drobnými nodulemi perlitu (obrázek 37).

Mikrostruktura TOO u hranice ztavení je tvořená feritem a drobnými nodulemi perlitu (obrázek 38).

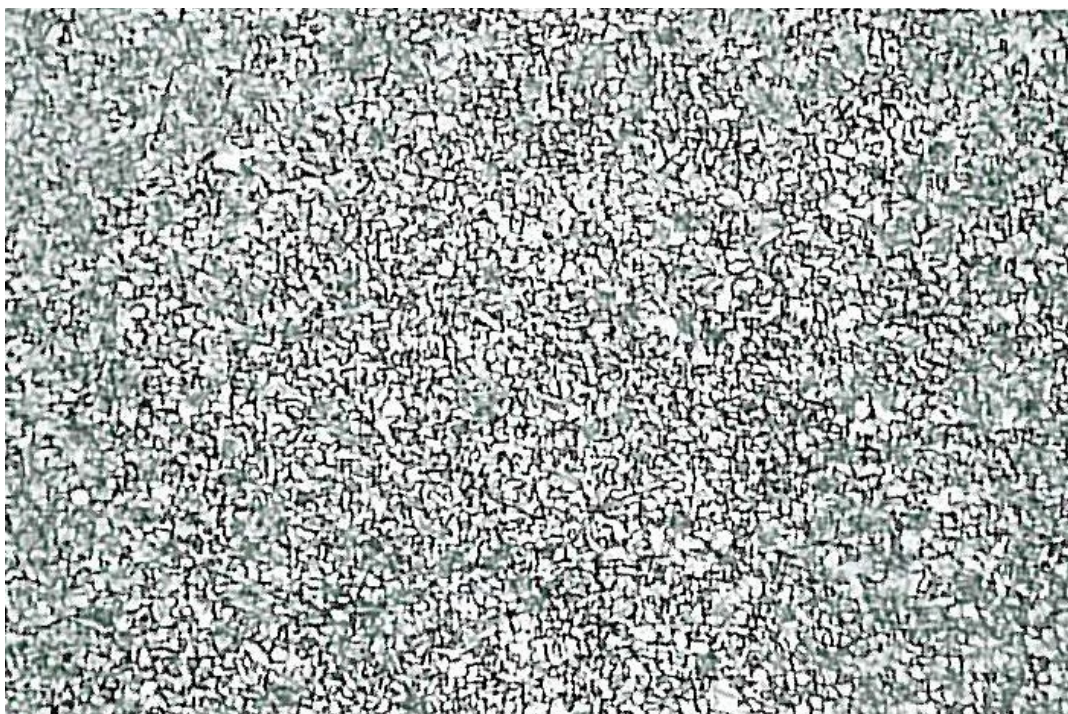
Mikrostruktura základního materiálu je tvořená feritem a drobnými nodulemi perlitu (obrázek 39).



Obr. 35 Makrostruktura vzorku 13. (zvětšeno 3x).



Obr. 36 Makrostruktura studený spoj. (zvětšeno 10x).



Obr.37 Mikrostruktura svarového kovu vzorku č. 13, ocel tl. 2 mm.(zv. 200x).



Obr. 38 Hranice ztavení. (zv. 200x)
vzorek č. 13 ocel tl. 2 mm.



Obr. 39 Základní materiál. (zv.200x)
vzorek č. 13 ocel tl. 2 mm.



5 ZÁVĚR

Pro komplexní vyhodnocení vzorků, určení ideálních svařovacích podmínek a hodnot je třeba vzít v úvahu mnoho aspektů. Z našeho zkoušení se jako ideální hodnoty jeví následující: otáčky 600 l.min^{-1} , smysl otáčení nástroje nemá vliv na kvalitu spoje, rychlost posuvu 60 mm/min při použití nástroje typ 1 (což je členitý válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem) při stejných podmínkách s hladkým válcovým nástrojem docházelo k trhlinám (vzorek 2). U vzorků 3 a 4 jsme vyzkoušely zvýšit posuv na 200 mm/min toto zvýšení vedlo k trhlinám v ZM. U vzorku 5 jsme svařovaly mat. tl 16 mm oproti 10 mm předchozích vzorků i tak byl spoj celistvý. Při zvýšení posuvu na 300 mm/min došlo k trhlinám v ZM. Tuto rychlost posuvu jsme již nepřekračovali (vzorek 6). U vzorků 7,8,9 při použití nástroje typ 3 a rychlosti osuvu 120 mm/min jsme měnily otáčky nástroje $800/400/600 \text{ ot. min}^{-1}$ což nemělo vliv na kvalitu svaru. Obecně lze říci, že u nástroje typu 3, (hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem $\text{Ø}15\text{mm} \times \text{Ø}6\text{mm}$), nedošlo k žádnému defektu. Byl ještě vyzkoušen nástroj typ 4, (hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a válcovým kolíkem $\text{Ø}15\text{mm} \times \text{Ø}6\text{mm}$), taktéž bez vad.

Dva poslední vzorky byly z konstrukční oceli tl. 2 mm , zde jsme použily u vzorku (14) nástroj typ 6 při relativně vysoké rychlosti posuvu 200mm/min – vykazoval svar defekty. Naopak při použití jiného nástroje ale stejných parametrů (vzorek 13) byl svar celistvý.

Po vyhodnocení vzorků doporučuji:

Pro **slitinu Al**: nástroj - hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a kuželovým kolíkem. Průměr ramene $\text{Ø}15\text{mm} \times \text{Ø}6\text{mm}$ (průměr kolíku v kořeni).

otáčky - 600 ot.min^{-1}

posuv - 120 mm. min^{-1}

Pro **ocel**: nástroj - WC Hladký válcový nástroj s konkávním ramenem a válcovým kolíkem. Průměr ramene $\text{Ø}12\text{mm} \times \text{Ø}4\text{mm}$.

otáčky - 400 ot.min^{-1}

posuv - 200 mm. min^{-1}



6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Thomas, W.T., Tool Drawing No. WMT104/04Lr1, Cambridge: TWI
- [2] American Welding Society (AWS) Dostupný z: www.aws.org/w/a/
- [3] Photograph courtesy of NASA Dostupný z http://mafspace.msfc.nasa.gov/cap_fsw-overview.html
- [4] American Welding Society (AWS) *Welding Handbook*. Danvers ISBN: 978-0-87171-053-6
- [5] Mahoney, M.W., C.G. Rho, J.G. Flintoff, W.H. Bindel, and R.A. Spurling, 1998, *Metallurgical and Materials Transactions*, 1964
- [6] Lienert, T.J., J.E. Grylls and H.L. Fraser, 1998, Second Symposium on Hot Deformation of Aluminium Alloys Rosemont, Illinois: 159-167.
- [7] Lienert, T.J., W.L. Stellwag Jr., B.B. Grimmett, and R.W. Warke, 2003, Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, *Welding Journal* 82.
- [8] Nandan, R., G.G. Roy and T. DebRoy, 2006, Numerical Simulation OF Three-Dimensional Heat Transfer and Plastic Flow During Friction Stir Welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(4): 1247-1259.
- [9] Tang, W., X. Guo, J.C. McClure, L.E. Murr, and A.C. Nunes, 1988, *Journals of Materials Processing & Manufacturing Science (USA)*, Vol.7, No.2 (10): 163-172.



- [10] Český svářečský ústav s.r.o. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování ČSN EN ISO 4063*. TNK 70 Svařování. ICS 01.040.25; 25.160.01 Březen 2010
- [11] NPS PROAL s.r.o. Dostupný z: <http://proal.cz/info/424415.htm>
- [12] Alcom Alval s.r.o. Dostupný z: <http://www.hlinik.cz/>
- [13] ESAB VAMBERK, s.r.o. *Technical Handbook, Friction Stir Welding*
- [14] A little friction at Boeing. Boeing Frontiers [online]. September 2004, volume 3, [cit. 2011-04-27]. Dostupný z WWW:<http://www.boeing.com/news/frontiers/archive/2004/september/i_tt.htm>.
- [15] Twi.co.uk [online]. c1996 - 2011 [cit. 2011-04-10]. Microstructure Classification of Friction Stir Welds. Dostupné z WWW:<<http://www.twi.co.uk/content/fswqual.html>>.
- [16] Microstructure and properties of FSW joints of 2017A/6013 aluminium alloys sheets. International Scientific Journal [online]. October 2008, Volume 33, [cit. 2011-04-24]. Dostupný z WWW:<http://www.archivesmse.org/vol33_2/3326.pdf>.
- [17] KUBÍČEK, Jaroslav. Technická konference Hrotovice 2010. Brno : TDS Brno - SMS, s.r.o., 2010. Nové směry ve spojování materiálů svařováním. Friction stir welding - třecí svařování rotujícím nástrojem, s. 626. ISBN 978-80-87102-05-3.



Poděkování patří mé rodině, za trpělivost a pochopení. Vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Sondelovi, Ph.D, za vřelý přístup při řešení mnohých otázek této diplomové práce.

7 SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy (vázané):	Protokol o zkoušení P/876/13	str. 1 - 4
	Protokol o zkoušení 4556Z13	
	Protokol o zkoušení P/876-1/13	str. 1 - 2
	Protokol o zkoušení P/876-2/13	str. 1 - 2
	Protokol o zkoušení 4557Z13	
	Protokol o zkoušení P/876-3/13	str. 1 - 4

**VÍTKOVICE**VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Potrubní 584/142
709 00 Ostrava-Hulvinky

Zkušební laboratoř č. 1035 akreditovaná ČIA

PRÓTOKOL O ZKOUŠENÍ

ke zkušebnímu listu č. 018/2013

Číslo protokolu	P/876/13
Strana č./ počet stran	1/4

Zákazník Český svářečský ústav s.r.o. Divize inspekce – inspekční orgán č. 4005 17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba		Výrobek Zkušební svarový spoj FSW-1		
Objednávka č. 018/2013		Rozměry		
Zakázka č. FSW		Materiál		
Tavba č.				
Doplňující údaje o zkoušeném výrobku Základní materiál: plech tl. 10 mm, jakost AlMg4,5Mn0,7 Poloha svařování: PA Metoda svařování: FSW Tepelné zpracování: - Druh svarového spoje: BW				
Vzorek č. / Datum přijetí FSW-1/M, FSW-1/Mi1 / 2013-03-27				
Zkoušky požadované zákazníkem	Zkušební metoda (norma) / Technické podmínky	Použité postupy		
Makrostruktura	ČSN EN 1321	1		
Mikrostruktura		1		
Postup č.	Pořadové č.	Identifikace zkušební postupu / metody	Zkušební zařízení	
1	209	Q1 – VTC.20 GEN – 0028 Zjišťování vad ve svarových spojech	VTC.20/030 946.20/021 NK 946.20/001 946.20/024	
Jméno		Podpis	Datum	Prohlášení: Dosahované výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem zkušebny.
Zkoušel	Ing. Pavel Honajzer		2013-04-02	
Kontroloval	Zdeňka Šestáková		2013-04-02	

VTC.20-4/2011



VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 584/142
709 05 Ostrava-Hulvák

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876/13
Strana č. počet stran	2/4

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-1/M je po naleptání leptadlem Adler - Matting (potíráním zkušební vzorku) bez vad (obr. 1).

Mikrostruktura (lept. 2% HF)

Mikrostruktura svarového kovu je tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obr. 2).

Mikrostruktura teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení je řádkovitá, tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obr. 3).

Mikrostruktura základního materiálu je řádkovitá, tvořená tuhým roztokem α a fází Mg_2Si (obr. 4).

2013-04-02
tel. +420 59595 2518



Ing. Zdeněk Štorkán
vedoucí metalografické zkušebny



VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Potravní 584/142
708 06 Ostrava-Hulváky

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876/13
Strana č. počet stran	3/4

Makrostruktura
(lept. Adler - Matting)

Obr. 1

zv. 3x



VTC-20-4/2011

Protokol je platný pouze s příslušnou stranou č. 1



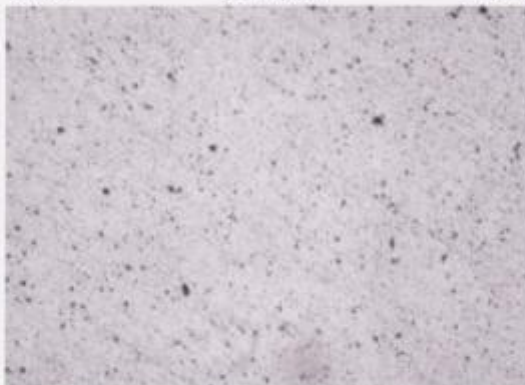
VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 884/142
709 00 Ostrava-Hulváky

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

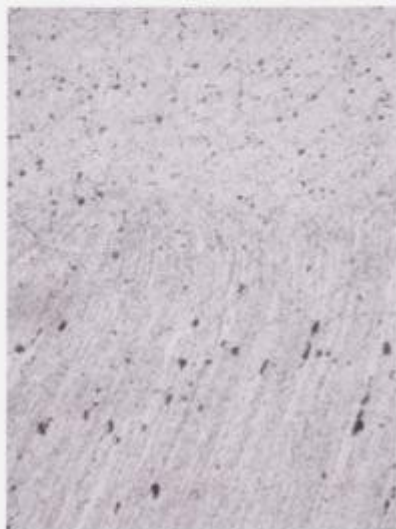
Číslo protokolu	P/876/13
Strana č. počet stran	4/4

Mikrostruktura (lept. 2% HF)

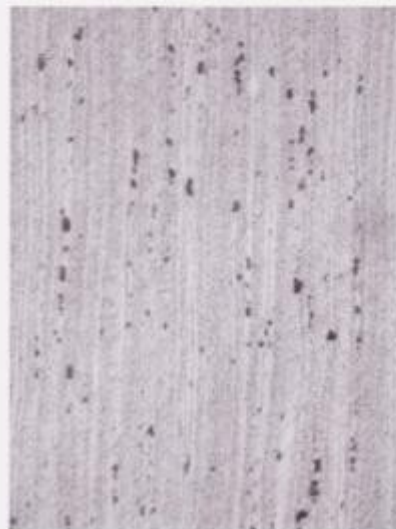
Obr. 2 svarový kov zv. 200x



Obr. 3 hranice ztavení zv. 200x




Obr. 4 základní materiál zv. 200x



VTC-20-4/2011

Protokol je platný pouze s příslušnou stranou č. 1



VITKONCE
VITKONCE TESTING CENTER s.r.o.
Potrubní 584/143
108 00 Ostrova-Hukáby

Protokol o zkoušení
ke zkušebnímu listu:

VTC 30 03011
Číslo protokolu
Břevná 2.
počet stran 1 / 1

Kupující

Český aviařský ústav s.r.o.
Divize inspekce - inspekční orgán č. 4005
Areál VŠB - TU Ostrava, 17 listopadu, 2717/15
708 33 Ostrova-Poruba

Svatový spoj č.:

Standard

Základní materiál

Svařovací materiál

Metoda svařování

Poloha svařování

Svatový spoj

Teplotní zpracování

FSW-1
10 mm

AMg4.5Mn0.7

FSW
PA
BW

Číslo kupní smlouvy

Číslo objednávky

Mez kluzu

R
R
R

Temperatura °C

10 mm

Prodané hodnoty mechanických vlastností

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

FSW-1

T1

T2

Číslo zkoušky

**VÍTKOVICE**VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 504/142
709 00 Ostrava-Hulvinky

Zkušební laboratoř č. 1036 akreditovaná ČIA

**PRŮTOKOL O ZKOUŠENÍ**

ke zkušebnímu listu č. 018/2013

Číslo protokolu	P/876-1/13
Strana č./ počet stran	1/2

Zákazník Český svářečský ústav s.r.o. Divize inspekce – inspekční orgán č. 4005 17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba		Výrobek Zkušební svarový spoj FSW-5	
Objednávka č. 018/2013		Rozměry	
Zakázka č. FSW		Materiál	
		Tavba č.	
Doplňující údaje o zkoušeném výrobku Základní materiál: plech tl. 16 mm, jakost AlMg4,5Mn0,7 Metoda svařování: FSW Poloha svařování: PA Druh svarového spoje: BW Tepelné zpracování: -			
Vzorek č. / Datum přijetí FSW-5/M / 2013-03-27			
Zkoušky požadované zákazníkem		Zkušební metoda (norma) / Technické podmínky	Použité postupy
Makrostruktura		ČSN EN 1321	1
Postup č.	Pořadové č.	Identifikace zkušební postupu / metody	Zkušební zařízení
1	209	Q1 – VTC.20 GEN – 0028 Zjišťování vad ve svarových spojích	VTC.20/030 946.20/021
Jméno		Podpis	Datum
Zkoušel	Ing. Pavel Honajzer	<i>Pavel Honajzer</i>	2013-04-02
Kontroloval	Zdeňka Šestáková	<i>Zdeňka Šestáková</i>	2013-04-02

VTC.20-4/30(1)

Prohlášení: Dosazené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem zkušebny.



VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 884/142
709 00 Ostrava-Hulváky

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876-1/13
Strana č. počet stran	2/2

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-5/M vykazuje po naleptání leptadlem Adler - Matting (potíráním zkušební vzorku) dutinu $h = 1,0 \text{ mm}$ (obráz. 1).

Makrostruktura (lept. Adler - Matting)

Obr. 1

zv. 3x



2013-04-02
tel. +420 59595 2518




Ing. Zdeněk Štorkán
vedoucí metalografické zkušebny

**VÍTKOVICE**VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 584/142
708 00 Ostrava-Hulvávky

Zkušební laboratoř č. 1028 akreditovaná ČIA

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ

ke zkušebnímu listu č. 018/2013

Číslo protokolu	P/876-2/13
Strana č./ počet stran	1/2

Zákazník Český svářečský ústav s.r.o. Divize inspekce – inspekční orgán č. 4005 17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba		Výrobek Zkušební svarový spoj FSW-7		
Objednávka č. 018/2013		Rozměry		
Zakázka č. FSW		Materiál		
		Tavba č.		
Doplňující údaje o zkoušeném výrobku Základní materiál: plech tl. 6 mm, jakost AlMg4,5Mn0,7 Metoda svařování: FSW Poloha svařování: PA Druh svarového spoje: BW Tepelné zpracování: -				
Vzorek č. / Datum přijetí FSW-7/M / 2013-03-27				
Zkoušky požadované zákazníkem	Zkušební metoda (norma) / Technické podmínky	Použité postupy		
Makrostruktura	ČSN EN 1321	I		
Postup č.	Pořadové č.	Identifikace zkušebního postupu / metody	Zkušební zařízení	
1	209	QI – VTC.20 GEN – 0028 Zjišťování vad ve svarových spojih	VTC.20/030 946.20/021	
Jméno		Podpis	Datum	Prohlášení: Dosudné výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem zkušebny.
Zkoušel	Ing. Pavel Honajzer		2013-04-02	
Kontroloval	Zdeňka Šestáková		2013-04-02	

VTC.20-4/2011

**VÍTKOVICE**VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 584/142
708 00 Ostrava-Hulávky

Zkušební laboratoř č. 1028 akreditovaná ČIA

PROTOKOL O ZKOUŠENÍ


ke zkušebnímu listu č. 018/2013

Číslo protokolu	P/876-2/13
Strana č./ počet stran	1/2

Zákazník Český svářečský ústav s.r.o. Divize inspekce – inspekční orgán č. 4005 17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba		Výrobek Zkušební svarový spoj FSW-7	
Objednávka č. 018/2013		Rozměry	
Zakázka č. FSW		Materiál	
		Tavba č.	
Doplňující údaje o zkoušeném výrobku Základní materiál: plech tl. 6 mm, jakost AlMg4,5Mn0,7 Metoda svařování: FSW Poloha svařování: PA Druh svarového spoje: BW Tepelné zpracování: -			
Vzorek č. / Datum přijetí FSW-7/M / 2013-03-27			
Zkoušky požadované zákazníkem	Zkušební metoda (norma) / Technické podmínky	Použité postupy	
Makrostruktura	ČSN EN 1321	I	
Postup č.	Pořadové č.	Identifikace zkušební metody / metody	Zkušební zařízení
1	209	QI – VTC.20 GEN – 0028 Zjišťování vad ve svarových spojkách	VTC.20/030 946.20/021
Jméno		Podpis	Datum
Zkoušel	Ing. Pavel Honajzer		2013-04-02
Kontroloval	Zdeňka Šestáková		2013-04-02

VTC-20-42011

Prohlášení: Dosazené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem zkušebny.



VITKOVICE
VITKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Polská 143
105 00 Olomouc - Hulávky



BAC
L 1036



AA
L 1036

Protokol o zkoušení

ke zkušebnímu listu:

Kupující

Česká svařecká ústava s.r.o.
Divize inspekcí - inspekční ústředí č. 4008
Análýza V55 - TU Olomouc, 17. listopadu 2172/15
708 33 Olomouc-Peruška

Svarový spoj č.:

FSW-7
6 mm

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo kuzel. směrový

Číslo objemový

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

018/2013

Číslo zkušební listu

0

**VÍTKOVICE**VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 884/142
708 00 Ostrava-Hulváky

Zkušební laboratoř č. 1038 akreditovaná ČIA

**PRŮTOKOL O ZKOUŠENÍ**

ke zkušebnímu listu č. 018/2013

Číslo protokolu	P/876-3/13
Strana č./ počet stran	1/4

Zákazník Český svářečský ústav s.r.o. Divize inspekce – inspekční orgán č. 4005 17. listopadu 2172/15 708 33 Ostrava-Poruba		Výrobek Zkušební svarový spoj FSW-13 Rozměry	
Objednávka č.	018/2013	Materiál	
Zakázka č.	FSW	Tavba č.	
Doplnující údaje o zkoušeném výrobku Základní materiál: plech tl. 2 mm, ocel Poloha svařování: PA Metoda svařování: FSW Tepelné zpracování: - Druh svarového spoje: BW			
Vzorek č. / Datum přijetí FSW-13/M, FSW-13/Mi1 / 2013-03-27			
Zkoušky požadované zákazníkem		Zkušební metoda (norma) / Technické podmínky	Použité postupy
Makrostruktura		ČSN EN 1321	1
Mikrostruktura			1
Postup č.	Pořadové č.	Identifikace zkušební metody / metody	Zkušební zařízení
1	209	QI – VTC.20 GEN – 0028 Zjišťování vad ve svarových spojkách	VTC.20/030 946.20/021 NK 946.20/001 946.20/024
	Jméno	Podpis	Datum
Zkoušel	Ing. Pavel Honajzer	<i>[Podpis]</i>	2013-04-02
Kontroloval	Zdeňka Šestáková	<i>[Podpis]</i>	2013-04-02

VTC.20-4/2011

Prohlášení: Dosazené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Protokol je možno reprodukovat pouze celý, jinak jen s písemným souhlasem zkušebny.



VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 584/142
709 00 Ostrava-Hulvák

PRŮTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876-3/13
Strana č. počet stran	2/4

Makrostruktura

Makrostruktura vzorku č. FSW-13/M vykazuje po naleptání 15% HNO_3 (potíráním zkušební vzorku) studený spoj $h = 4,3 \text{ mm}$ (obr. 1).

Mikrostruktura

(lept. 4% HNO_3)


Mikrostruktura svarového kovu je tvořena feritem a vyloučenými drobnými nodulemi perlitu (obr. 2).

Mikrostruktura teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení je tvořena feritem a drobnými nodulemi perlitu (obr. 3).

Mikrostruktura základního materiálu je tvořena feritem a drobnými nodulemi perlitu (obr. 4).

2013-04-02
tel. +420 59595 2518




Ing. Zdeněk Štorkán
vedoucí metalografické zkušebny



VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Potrubní 584/142
705 05 Ostrava-Hulvísky

PRŮTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876-3/13
Strana č. počet stran	3/4

Makrostruktura
(lept. 15 % HNO_3)

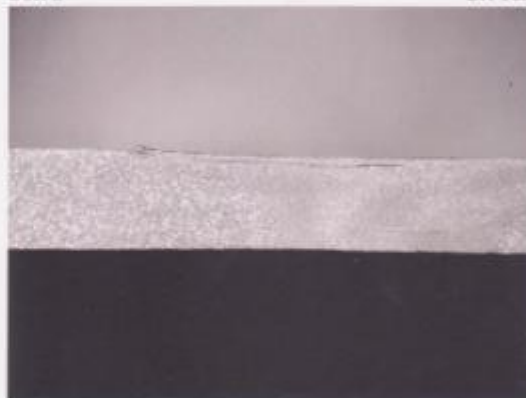
Obr. 1

zv. 3x



Obr. 2

zv. 10x





VÍTKOVICE
VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
Pohraniční 584/142
709 00 Ostrava-Hulvásky

PRŮTOKOL O ZKOUŠENÍ

Číslo protokolu	P/876-3/13
Strana č. počet stran	4/4

Mikrostruktura (lept. 4% HNO_3)

Obr. 3 svarový kov zv. 200x



Obr. 4 hranice ztavení zv. 200x



Obr. 5 základní materiál zv. 200x



VTC-20-4-2011

Protokol je platný pouze s příslušnou stranou č. 1

